

现代气候 统计诊断 与预测技术

(第2版)

魏凤英 编著

气象出版社

现代气候 统计诊断 与预测技术

（第二版）

陆凤荣 编著

气象出版社

现代气候 统计诊断 与预测技术

(第2版)

魏凤英 编著

气象出版社

内 容 简 介

本书主要介绍了近年来发展的气候统计诊断与预测新方法、新技术。其中包括气候变化趋势和突变检测、气候周期识别、分离气候变化时空结构、诊断两变量场耦合特征以及气候预测等方面的技术。还介绍了作者发展的气候预测新方法。本书不仅给出方法的原理和数学公式,还给出了计算步骤、计算结果分析要点及应用实例。

本书可供气象科研、业务人员和有关院校师生阅读,特别适合具有一定气象统计基础知识的人员使用,亦可供海洋、地震、水文、环保、生态等相关行业的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代气候统计诊断与预测技术/魏凤英编著. —2 版. —北京:

气象出版社, 2007. 6

ISBN 978-7-5029-4299-1

I. 现… II. 魏… III. ①气象资料-统计分析②天气变化-预测 IV. P468.0

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 038809 号

出版发行:气象出版社

地 址:北京中关村南大街 46 号 邮 编:100081

网 址:<http://cmp.cma.gov.cn> E-mail: qxcbs@263.net

电 话:总编室 010-68407112, 发行部 010-62175925

责任编辑:郭彩丽 王桂梅 终 审:黄润恒

封面设计:王 伟 责任技编:刘祥玉

责任校对:赵寄存

印 刷 者:北京京科印刷有限公司

开 本:889mm×1194mm 1/32 印 张:9.625

字 数:286 千字

版 次:2007 年 5 月第 2 版 印 次:2007 年 5 月第 2 次印刷

定 价:30.00 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

再版前言

本书第一版自出版发行以来,受到广大读者的普遍关注和喜爱。它能够气候诊断、预测的研究和业务工作有所帮助,我感到十分欣慰。第一版出版后很快销售一空,许多读者通过各种渠道反映,渴望本书能够再版。在读者和出版社编辑的多次催促下,终于完成了本书的修订工作。

事实上,研究、探索气候历史资料的主要目的是将长期趋势、年代际振荡和年际振荡的气候“信号”从含有“噪声”的背景变率中分离出来。从气候学的角度而言,气候信号是大气-海洋-冰雪圈系统内部物理过程相互作用的结果,它影响的空间范围和时间尺度非常宽泛,而且气候系统成员的相互作用还包括了不同尺度的正、负反馈作用。气候信号的检测引起越来越多气候学者的兴趣,与此同时,更多新颖的、具有更强功效的气候信号检测方法孕育而生。在本书修订过程中专门增加了第9章,本章从气候信号与噪声的定义出发,对检测气候信号的方法做了概述,对近几年发展的几种新的气候信号检测方法进行了详细的介绍,并给出应用实例,这些内容是同类气候诊断书籍中未曾涉及的。另外,本书还增加了第12章,专门介绍近年来作者提出的短期气候预测的新思路和新方法。其他修订的内容还有:在第4章中增加了非平稳气候序列趋势分析的新方法;在第5章中增加了针对非平稳气候序列的突变检测方法。

需要说明的是,在撰写第5章突变检测 Bernaola Galvan 分割算法时,参考了封国林研究员等发表的相关文献。第9章中引用的

MTM-SVD的应用实例,是韩雪同学硕士论文中的计算结果。在此向他们对本书修订给予的支持深表谢意。另外,我还要向在本书修订过程中给予我帮助的郭彩丽、王桂梅编辑及其他学者和同事表示感谢。

由于本人水平有限,书中不当之处在所难免,敬请读者指正。

魏凤英

中国气象科学研究院
灾害天气国家重点实验室

2007年1月

原版序

自 20 世纪 80 年代以来,随着计算机技术的迅猛发展,现代统计学突破对观测资料统计指标的简单计算和分析的局限,展现了重大飞跃。这种飞跃不仅体现在统计技术内容的深度和广度上,更体现在研究问题的新思维和新观点上。与此同时,气候统计学在解决气候问题过程中亦有了令人惊喜的发展,新方法、新技术不断涌现,为气候研究注入了生机与活力,并已渗透到气候监测、诊断及预测的各个方面。应该说,应用统计方法研究气候问题的范围比以前拓宽了许多,除气候变化规律及预测的一般性研究外,区域性和全球性气候变化归因问题、气候数值模拟的检验、气候可预报性、运用不同时刻多个初始场的集合预报以及多个独立预报的集成等问题都运用了现代统计技术,且已取得了令人瞩目的成果。

我国的气候统计始自 20 世纪 60 年代。自那时以来,我国一直站在世界气候学术研究的前沿,至今已出版了 10 余部论著,其数量和学术内容均位于国际学术界的前列。但近年来,由于计算机在气候统计方面的应用的发展以及缺少对气候统计理论研究的投入,在气候统计研究和应用方面似有落伍之势态。事实上,由于气候的固有特性,无论使用什么方法进行研究,即便是气候动力学和数值模拟,也需用现代统计技术进行处理。

魏凤英编著的《现代气候统计诊断与预测技术》较系统地介绍了气候统计诊断和预测方法,内容新颖,实用性强,更有理论,其中多维最大熵谱、Lepage 突变检测、主振荡型分析等内容是其他同类书籍中未曾

涉及的,尤其可贵的是,书中还介绍了作者本人发展的若干新方法。此书以应用为目的,以计算机计算为依托,详尽介绍了每种方法的原理及计算步骤,并给出了作者从事气候研究中积累的大量应用实例,可以帮助读者更好地应用这些方法去解决气候研究的实际问题。我衷心祝贺本书的出版,以飨读者,更为我国现代气候统计的发展奠定基础。

么枕生

1999 年 6 月

原版前言

气候变化和异常已成为当今科学研究的重大课题之一,受到国家前所未有的重视,乃至成为公众街头巷尾、茶余饭后议论的话题。使用气候动力理论对气候变化和异常进行模拟、诊断,藉此达到预测气候的目的,构成了气候研究的主流方向之一。与此同时,人们惊喜地发现,气候统计诊断与预测技术亦有了长足的发展,近两年更呈上升趋势。正在不断推出的富有成效的新观点、新方法给统计诊断和预测带来新的生机,在气候研究和气候预测业务中起到举足轻重的作用。广大气候科研和业务人员迫切希望掌握这些新技术。为此,在 1997,1998 和 1999 年,由中国气象科学研究院和北京气象学院联合举办了三期全国性“气候统计诊断与预测”讲习班,收到了十分满意的效果。许多省、市也相继开办了类似的培训班。但遗憾的是,至今还没有一套较为完整的教材,这给进一步理解和应用这些方法带来一定困难。为此,我萌发了撰写本书的想法。现在这一想法终于得以实现,将本书敬献给关心气候的学者、同仁和各界人士。

众所周知,在计算机进入概率论和数理统计领域后,概率统计出现了重大飞跃,出现了统计计算的新分支,它基于统计数学理论,并为解决在各个学科、各个领域提出的统计问题而不断发展。我们将此称为现代统计。本书的宗旨就是把近 20 年来在气象领域发展的现代统计技术介绍给读者。除介绍国外发展的新统计方法外,还着重介绍了作者自己发展的若干气候预测新方法。一部分必须介绍的常用经典方法,也尽量注入新的分析思想,从新的角度加以认识和使用。为节省篇

幅,本书着眼于实际应用,没有详尽地给出这些方法的数学原理,但列出了使用所必需的数学公式。从解决气候研究和应用中的实际问题出发,以计算机计算为依托,单刀直入地介绍每种方法的基本思想、原理、适用对象、计算步骤及计算结果分析要点。书中给出的大量应用实例,均是作者从事气候统计诊断与预测研究中长期积累的或是为编著本书专门计算的,力图通过这些算例为读者理解和使用这些方法提供帮助。在不少算例中给出了原始数据,便于使用者在计算机上实践操作。尽管本书属大气科学范畴,但书中介绍的诊断、预测技术可以很容易地“移植”到海洋、地震、环境、水文及生态等学科领域。

本书首先对气候统计诊断与预测的基本概念、包含的内容、基本统计量及统计检验等进行必要的介绍。然后,依气候统计诊断及预测性质分类,对方法逐一进行叙述。

承蒙中国气象科学研究院曹鸿兴先生审阅了全书的初稿。在写作过程中,曹鸿兴和张先恭先生自始至终给予我热情的鼓励、悉心的指导和积极的帮助,对此我表示深深的谢意。我还要感谢北京气象学院江剑民、王永中、郑祖光先生及我的同事朱文妹、张光智、谷湘潜等,他们为本书的完成曾提供过种种帮助或有益的建议。衷心感谢我国著名气候学家、气候统计学界老前辈么枕生教授为本书作序。

由于作者水平有限,书中错漏之处在所难免,恳请读者指正。

21 世纪的大门正向我们敞开。21 世纪必将是一个以科技素质为主导的竞争社会,只有拥有先进的科学技术,才会占领社会的制高点。正如变幻纷繁的世界一样,地球上的气候在 21 世纪也将是多变的,气候的变化也将深深影响着人类社会。对气候的监测、诊断和预测也会永不停息。愿本书能为研究 21 世纪的气候做出一点微薄的贡献。

魏凤英

1999 年 6 月

目 录

再版前言

原版序

原版前言

1	绪论	(1)
1.1	气候统计诊断概述	(1)
1.2	气候统计预测概述	(6)
2	基本气候状态的统计量	(13)
2.1	中心趋势统计量	(13)
2.2	变化幅度统计量	(15)
2.3	分布特征统计量	(16)
2.4	相关统计量	(18)
3	基本气候状态的统计检验	(23)
3.1	统计检验概述	(23)
3.2	气候稳定性检验	(24)
3.3	相关性检验	(30)
3.4	分布的统计检验	(32)
4	气候变化趋势分析	(36)
4.1	线性倾向估计	(37)
4.2	滑动平均	(41)
4.3	累积距平	(43)
4.4	五、七和九点二次平滑	(45)
4.5	五点三次平滑	(46)
4.6	三次样条函数	(47)
4.7	潜在非平稳气候序列趋势分析	(51)
4.8	变化趋势的显著性检验	(55)

5	气候突变检测	(57)
5.1	滑动 t 检验	(58)
5.2	克拉默(Cramer)法	(60)
5.3	山本(Yamamoto)法	(61)
5.4	曼-肯德尔(Mann-Kendall)法	(63)
5.5	佩蒂特(Pettitt)方法	(66)
5.6	勒帕热(Le Page)法	(66)
5.7	BG(Bernaola-Galvan)分割算法	(69)
6	气候序列周期提取方法	(71)
6.1	功率谱	(71)
6.2	最大熵谱	(76)
6.3	交叉谱	(82)
6.4	多维最大熵谱	(88)
6.5	奇异谱分析	(93)
6.6	小波分析	(99)
7	气候变量场时空结构的分离	(105)
7.1	经验正交函数分解	(106)
7.2	扩展经验正交函数分解	(113)
7.3	旋转经验正交函数分解	(117)
7.4	复经验正交函数分解	(125)
7.5	主振荡型分析	(131)
7.6	循环稳态主振荡型分析	(137)
7.7	复主振荡型分析	(140)
8	两气候变量场相关模态的分离	(143)
8.1	奇异值分解式定理及其计算	(144)
8.2	典型相关分析	(146)
8.3	BP 典型相关分析	(157)
8.4	奇异值分解	(160)
8.5	SVD 与 CCA 及有关问题的讨论	(169)

9	气候信号检测方法	(172)
9.1	气候信号与噪声	(172)
9.2	气候信号检测方法概述	(173)
9.3	小波变换原理的延拓及应用	(175)
9.4	经验模态分解-希尔伯特(Hilbert)-黄氏(Huang) 变换	(182)
9.5	MTM-SVD 方法	(191)
9.6	地统计学在气象分析中的应用	(204)
10	最优回归预测模型	(213)
10.1	多元线性回归的基本方法	(214)
10.2	最优子集回归	(220)
10.3	主成分回归	(226)
10.4	特征根回归	(230)
10.5	岭回归	(235)
11	均生函数预测模型	(239)
11.1	均值生成函数	(239)
11.2	双评分准则	(244)
11.3	均生函数预测模型	(247)
11.4	模糊均生函数模型	(253)
11.5	最优气候均态模型	(256)
12	气候趋势预测及集成预测新方法	(260)
12.1	全国夏季降水趋势分布预测方法	(260)
12.2	全国夏季降水区域动态权重集成预测	(267)
12.3	华北干旱的多时间尺度组合预测模型	(269)
	参考文献	(277)
	附录	(285)

1 绪 论

本章对气候统计诊断和预测的基本问题、内容和方法分别进行概述,对它们之间的相互联系进行鸟瞰式介绍。这些内容是阅读本书的基础。

1.1 气候统计诊断概述

1.1.1 气候统计诊断的含义

这里给出有关名词的含义。

诊断 “诊断”一词源于医学。医生通过对病人的了解和检查(如中医用望、闻、问、切等办法;西医则用血压计、X光透视、超声波等仪器检查),判断病人所患何种疾病及所患疾病的原因、部位、性质及患病程度,这一过程称为诊断。

统计诊断 “统计诊断”是指对统计建模及统计推断过程进行诊断。它是 20 世纪 70 年代中期才发展起来的一门统计学新分支(韦博成等 1991)。统计诊断是对收集起来的数据、以数据为基础建立的模型及相应的推断方法的合理性进行分析。通过一些统计量来检查数据、模型及推断方法中可能存在的“病患”,提出“治疗”办法。为了克服模型与客观实际之间可能存在的差异,需要寻找一种诊断方法,判断实际数据与模型之间是否存在较大偏离,并采取相应对策。这就是数理统计意义下诊断的基本内容。通过统计诊断,找出严重偏离模型的异常点,区分出那些特别影响统计推断的强影响点。其中,对多元线性回归的诊断是统计诊断的主要内容之一。

气候统计诊断 将“诊断”一词引入到气候学研究中,用某些手段

根据气候观测资料对气候变化与气候异常的程度及成因做出判断,即称之为气候诊断。由于是用统计手段进行气候诊断,故将这种诊断称为气候统计诊断。

可见,气候统计诊断的含义与统计学的分支——统计诊断的含义是不同的。前者是用统计学方法对气候过程进行诊断,而后者是对统计建模与统计推断过程中可能出现的问题进行诊断。

另一方面,气候统计诊断与通常的气候统计分析也有一些区别。气候统计分析是根据大量气候资料用概率论与数理统计中的方法,研究气候演变的时空变化特征和规律。气候统计诊断除了进行以上一系列分析外,还要进行一系列的科学综合和推断,期望通过统计方法这一气候诊断的重要手段对气候变化与气候异常及其成因做出正确判断(王绍武 1993,马开玉 1996)。例如,气候研究中所谓气候变化归因问题,就是气候诊断的重要内容。在实际应用时,气候统计分析与诊断又往往很难区分开。

1.1.2 气候统计诊断研究的内容

概括地讲,采用统计方法进行气候诊断研究,主要包括以下几方面内容:

(1)应用统计方法了解区域性或全球性气候变化的时空分布特征、变化规律及气候异常的程度。主要针对月以上至几十年时间尺度的变化,即主要研究月、季、年及年代 4 个时间尺度的气候变化。

(2)通过统计方法探索气候变量之间及其与其他物理因素之间的联系,研究造成气候异常的原因,进而探索气候异常形成的物理机制。

(3)对气候数值模拟结果与实际变化状况之间的差异进行统计诊断。

1.1.3 现代气候统计诊断技术窥视

气候诊断使用的统计技术涉及统计学多个分支,如统计检验、时间序列分析、谱分析、多元分析、变量场展开等。近年来,在引入气候模式

对气候异常和变化进行诊断的同时,气候统计诊断技术也有了长足的发展,引起气候工作者的关注。作者之所以在书名中的“气候统计诊断”前面加上“现代”一词,用意在于希望本书能够尽量反映国际气候统计诊断技术的现代水平。如同医学诊断一样,随着科学技术的发展,现代诊断技术与经典诊断技术有了显著的不同。新概念、新方法不断涌现,逐步取代了原有的经典诊断方法,为气候诊断研究提供了更科学、更有效的手段,同时也拓宽了人们认识气候系统的视野(von Storch 等 1995a,1995b;Wilks 1992;魏凤英 1996)。与经典方法相比,现代统计诊断技术的发展主要体现在如下几方面:

1.1.3.1 气候变化趋势和突变检测

从气候序列中分离气候变化趋势,不仅采用滑动平均、累积距平、线性倾向估计等传统方法,还引入了样条函数等数据拟合的新方法。采用这些方法对气候序列进行分段曲线拟合,能够更好地反映其真实的变化趋势。此外,还注重对变化趋势进行显著性检验。

目前,尽管突变统计诊断技术还很不成熟,但是针对突变问题,已经借助统计检验、概率论等发展了一些行之有效的检测方法,如气候均值、变率以及事件发生与否的检验。气候诊断研究中使用最多的是均值的统计检验。其中,不但使用参数统计检验,而且还使用非参数统计检验。

1.1.3.2 气候振荡分析

近年来,诊断气候振荡的技术发展很快。从不连续的周期图、方差分析、谐波分解发展到连续谱以及一维、多维最大熵谱。近年来,又发展了奇异谱和小波变换技术,前者能将动力重构与经验正交函数联系起来,后者能将不同波长的波幅一目了然地展现在同一张二维图像上。这些新技术与传统技术相比,分辨率更高,适用性更强,对于揭示气候序列不同时间尺度的振荡特性起到了很大的作用。

1.1.3.3 气候变化时空结构诊断

以经验正交函数为基础的对气候场进行时空分布特征的诊断技术也有了令人瞩目的发展。针对气候变量场特征分析的不同需要,发展了揭示变量场移动性分布结构的扩展经验正交函数、着重表现空间的相关性分布结构的旋转经验正交函数、可以展示空间行波结构的复经验正交函数和描述动力系统非线性变化特征的主振荡型、循环平稳(cyclostationary)主振荡型、复主振荡型等。

1.1.3.4 气候变量场间耦合特征诊断

气候研究中常常遇到两个变量场的相关问题,如相隔遥远的不同区域同一时间或不同时间变量场间存在的遥相关、海洋与大气的相互作用、大气环流或下垫面对气温和降水的影响等问题。过去讨论这些问题多用相关分析。现在将典型相关这一有着坚实的数学基础、推理严谨的两组变量分析工具移植到两变量场耦合特征的诊断中。还提出了从讨论两个场主分量出发的 BP 典型相关分析(Barnett 等 1987)。同时,奇异值分解也在两场耦合特征研究中广泛使用。

1.1.4 气候统计诊断的一般步骤

利用统计方法进行气候诊断,一般可分为下列几个步骤:

1.1.4.1 收集资料

从研究的实际问题出发,确定统计诊断的对象,收集有关的资料。选取的资料应该准确、精确,并具均一性、代表性和比较性。资料的样本长度和区域范围与所研究问题的对象有关。例如,研究中国气候年代际变化规律,应该收集半个世纪以上的样本;研究准两年振荡则有数十年样本就够了。在研究气候场空间结构时,选取某一区域范围内的站点布局应该满足均一性和可比较性,否则就不能很好地反映变化的真实状况或诊断结果缺乏代表性,且难以比较各区域各时期气候特征的差异。