


“十三五”国家重点出版物出版规划项目


大气科学中的 统计方法

(第三版)

Daniel S. Wilks © 著
朱玉祥 等 © 译著



*Statistical Methods in the
Atmospheric Sciences*

 气象出版社
China Meteorological Press

ELSEVIER

出版物出版规划项目


大气科学中的统计方法

(第三版)

Daniel S. Wilks 著

朱玉祥 等 译著



 气象出版社
China Meteorological Press

图书在版编目(CIP)数据

大气科学中的统计方法：第三版 / (美) 丹尼尔·
威尔克斯 (Daniel S. Wilks) 著；朱玉祥等译著. —
北京：气象出版社，2017. 10

书名原文：Statistical Methods in the
Atmospheric Sciences(Third Edition)

ISBN 978-7-5029-6401-6

I. ①大… II. ①丹… ②朱… III. ①大气科学—统
计方法 IV. ①P4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 048397 号

北京市版权局著作权合同登记：图字 01-2014-0715 号

大气科学中的统计方法(第三版)

Daqi Kexue zhong de Tongji Fangfa(Di San Ban)

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 邮政编码：100081

电 话：010-68407112(总编室) 010-68408042(发行部)

网 址：<http://www.qxcbs.com>

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

责任编辑：张 媛 崔晓军

终 审：吴晓鹏

责任校对：王丽梅

责任技编：赵相宁

封面设计：博雅思企划

印 刷：北京中科印刷有限公司

开 本：787 mm×1092 mm 1/16

印 张：36

字 数：922 千字

版 次：2017 年 10 月第 3 版

印 次：2017 年 10 月第 1 次印刷

印 数：1~2000

定 价：180.00 元

Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, Third Edition

Daniel S. Wilks

ISBN: 978-0-12-385022-5

Copyright © 2011 Elsevier Inc. All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise without the prior written permission of the publisher

Permissions may be sought directly from Elsevier's Science & Technology Rights Department in Oxford, UK: phone (+44) (0) 1865 843830; fax (+44) (0) 1865 853333; email: permissions@elsevier.com. Alternatively you can submit your request online by visiting the Elsevier web site at <http://elsevier.com/locate/permissions>, and selecting Obtaining permission to use Elsevier material

Notice

No responsibility is assumed by the publisher for any injury and/or damage to persons or property as a matter of products liability, negligence or otherwise, or from any use or operation of any methods, products, instruction or ideas contained in the material herein.

Authorized Chinese translation published by China Meteorological Press.

《大气科学中的统计方法》(第三版)(朱玉祥 等译)

ISBN: 978-7-5029-6401-6

Copyright © Elsevier Inc. and China Meteorological Press. All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or any information storage and retrieval system, without permission in writing from Elsevier (Singapore) Pte Inc. Details on how to seek permission, further information about the Elsevier's permissions policies and arrangements with organizations such as the Copyright Clearance Center and the Copyright Licensing Agency, can be found at our website: www.elsevier.com/permissions.

This book and the individual contributions contained in it are protected under copyright by Elsevier Inc. and China Meteorological Press (other than as may be noted herein).

This edition of Statistical Methods in the Atmospheric Sciences is published by China Meteorological Press under arrangement with ELSEVIER INC.

This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong, Macau and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本版由 ELSEVIER INC. 授权气象出版社在中国大陆地区(不包括香港、澳门以及台湾地区)出版发行。

本版仅限在中国大陆地区(不包括香港、澳门以及台湾地区)出版及标价销售。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受民事及刑事法律之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签,无标签者不得销售。

序 一

朱玉祥是我的博士研究生,他当时跟我做博士论文的时候,主要是做区域气候模拟。当时,我就告诉他,虽然你的主要工作是用气候模式做数值模拟,但一定要重视统计方法的学习和应用。2007年毕业后,他到中国气象局气象干部培训学院工作,一直从事气象统计方法的教学培训工作。

5年前,当他给我说打算翻译《Statistical Methods in the Atmospheric Sciences》的时候,我感到很高兴,因为我知道这是一本国际上通用的大气科学统计分析方法的优秀教材。但我很清楚,翻译这本书难度是很大的:一方面是工作量很大,接近100万字;另一方面是难,书中的很多专业术语在以前的中文文献中很少出现,要想给出准确的中文翻译并不是一件容易的事。但我深知统计方法在气象科研和业务中的重要价值,因此我给了他热情的鼓励,希望他能把这件事做好,为我国增加一本国际通用的中文气象统计教材。

数理统计是气象科研和业务中的重要工具。大气科学中的变量都是随机变量,而概率统计是研究随机现象的数学语言,因此,统计方法长期以来在大气科学中具有广泛应用。随着数值预报模式水平的进步,数值模式早已不仅仅是求解描述大气运动和热力过程的方程组,其中也大量使用了统计方法。统计方法在数值模式的资料同化、集合预报、次网格尺度物理过程参数化方案、数值产品统计释用、模式检验等方面都有广泛应用。因而,统计方法也日益成为数值模式的重要组成部分,在重视数值模式发展的同时,必须重视相应的统计方法,两者是相辅相成的。要想继续提高数值预报的水平,需要深入研究气象统计理论与方法。更进一步说,动力和统计都是研究气象问题的工具,这是由气象问题既包含确定性也包含不确定性的特点所决定的。工具本身并没有优劣之分,只有是否适合之说。正是大气变量的特点,决定了气象科研和业务中既需要动力也离不开统计,并且二者结合,充分发挥各自的优势,是未来发展的方向。

大气无国界,气象科研和业务需要广泛的国际交流与合作。气象科研和业务的高水平科研成果,很多都是在英文期刊上发表的。国内的气象科研和业务人员需要阅读这些英文文章,并且也有在这些英文期刊上发表科研论文的需求。而缺乏一本与国际接轨的、国际通用的中文气象统计教科书,给这些人员读懂和发表英文文章带来了很大困难。Wilks教授的《Statistical Methods in the Atmospheric Sciences》,在美国康奈尔大学大气科学及相关专业的本科生和研究生中使用多年,并不断补充修订,渐趋完善,被很多国家大气科学及相关专业作为本科生和研究生的教材。同时,该书在很多国家也是气象、气候和地球物理相关学科科研和业务人员的参考书。对于国内的不少读者来说,直接阅读英文原著,特别是包括很多复杂数学公式和大气科学专业知识的英文书,是一件很耗时的事情。而朱玉祥等翻译完成的《大气科学中的统计方法》可以避免直接阅读英文原著的困难。当然,读者也可以读完中文版后再读英文原著,或者把中英文版本对照着读,这样收获会更大。相信本书对于阅读和发表英文文章都有帮助。

阅读统计书需要有概率论的知识和相关的数学基础,并且复杂的公式较多,一般初学的读

者不可能一次就完全读懂。可以把这本书作为工具书时常翻阅,这样才能不断加深理解。长期坚持,定能受益。我希望广大气象同行将来能出版更多的优秀气象统计书,为我们国家气象科研和业务水平的提升做出贡献!

丁一汇

于北京 中国气象局

2016年6月

序 二

在这本书中,作者以气象资料作为例子,对大气科学中的统计分析处理方法进行了详细讲述,从方法原理到求解步骤,说理清楚,层次分明,逻辑严密。

推断是基于数据分析得出的结论或做出的决策。统计推断是基于现实世界观察到的特征而得到的有关世界的不可观察属性的结论,是数据处理的重要方法之一。贝叶斯推断是近年来统计推断的新发展,它可以被认为是一个动态处理过程,从先验信息开始,收集以样本信息为形式的证据,并以后验分布作为结束。该书在推断方法上,新增加了关于贝叶斯推断的一章。另外,书中也有关于趋势检验和多重检验的新章节,以及自助法的进一步讨论,涵盖了目前最新的统计推断方法。

动力统计预报是大气科学中近年来发展迅速的预报技术之一。该书介绍了目前这方面新发展的广义线性模型,并且增加了集合 MOS 预报发展的新章节,是数据处理方法在大气科学中应用的新进展。

该书是从事气象统计教学的教师和学生的一本很好的参考书,该书在方法介绍中,除了有详尽的气象例子外,每章后面还有供学生练习的习题,可以进行练习,以便加深对所学理论的理解。

当代社会正处在大数据时代,大气科学领域也正在出现越来越多的资料数据,对于研究此学科的专家学者,如何利用最新的数据处理方法,解决大气科学中的各种问题,该书非常值得推荐。当然,在自然科学的其他学科以及社会科学中,也都存在大量的资料数据,对于从事这些领域研究的专家学者来说,它同样也是一本值得参考的好书。

黄嘉佑

于北京大学

2016年6月

译者序

《大气科学中的统计方法》终于要出版了,我竟难以抑制自己内心的激动,虽然我一直是一个冷静的人。怀胎 10 月就已十分漫长,而翻译这本书,居然花了我 5 年的时间,我怎能不激动呢?

我本科是数学专业,毕业后在山东老家的一家银行做会计,不甘在一个小地方待下去的想法,促使我报考了研究生。但很遗憾,第一志愿没有被录取。当时上网很不方便,我到一家网吧上网时,偶然看到南京气象学院的调剂信息,于是发了一封 E-mail。很幸运,这个偶然的时机使我走上了气象之路。在南京气象学院,我学到了很多气象知识,尤其是我的硕士导师苗春生教授和闵锦忠教授给了我很多指导和帮助。但我最大的遗憾,就是当时没有去听丁裕国教授、施能教授、吴洪宝教授、江志红教授的气象统计课。以致后来,我只能读着这些老师的书自学,自学当然是很花时间的,理解的深度往往也不够,甚至可能理解错误。记得刚入校的时候,有个老师说,现在都是数值预报了,统计方法不中用了。这个观点误导了我好几年。后来跟丁一汇院士读博士,我对天气气候知识的理解有了进一步提高,但当时我还是更看重模式,心里对统计依然是很轻视的,虽然丁老师告诉过我需要重视统计方法的学习和应用。

博士毕业后,我到中国气象局气象干部培训学院工作,被安排从事气象统计方法的教学培训。初为人师,备课是一个很大的任务。特别是统计课有很多数学公式,也需要很多实际例子,对当时的我来说十分困难。这时,黄嘉佑老师、魏凤英老师给了我无私的指导和帮助。为了教学方便,我把黄老师的统计学书敲进电脑里,变成了 word 版,魏老师的统计学书也有几章做过类似工作。随着讲课次数的增多,我的课件逐渐充实起来,也自己编写了教材和讲义。很多听课的学员都给我提出了很好的意见和建议,这对于我改进教学很有帮助。在教学过程中,我对统计方法在气象工作中的重要价值有了更深入的认识,也逐渐具有了系统全面的气象统计知识,这时再来看我所从事的气象科研和业务工作,思路豁然开朗了。这也使我在授课过程中,可以对气象科研和业务工作的方法论进行讲解。现在回想当年硕士论文做雷达资料同化、博士论文做青藏高原积雪数值模拟的工作,其实模拟的效果还是不错的,但由于对统计方法知之甚少,缺乏思路,致使当时的分析太粗糙了。

这几年我从事气象统计教学培训的体会是,气象统计要想取得好的教学效果,必须要有一本好教材,但我对自己编写的教材和讲义并不十分满意,所以,我一直关注国外气象统计方面的最新进展。2011 年,美国康奈尔大学 Wilks 教授的《Statistical Methods in the Atmospheric Sciences》的第三版刚一出来,有个师兄就告诉了我这个消息。由于以前已经阅读过第二版,当看到几乎全新的第三版时,我就第一时间向部门的主管领导俞小鼎教授做了汇报,并且说想把这本书翻译成中文。俞教授说,可以翻译,但你要要有心理准备,这个工作很耗时间,并且可能出力不讨好,现在很多人都不愿意做这种工作。我也向丁老师做了汇报,丁老师给了我热情的鼓励,希望我把这件事做好,翻译成精品。

于是,我开始了翻译工作。首先是读懂原书,这是一本大部头的厚书,读懂并不容易。同

* 今南京信息工程大学,下同

时,还要阅读大量中文气象统计书,熟悉和理解有关名词术语。为了尽快完成翻译,我不得不在节假日加班,很多时候晚上也需要加班。多少次深夜从办公室回家时,路上空无一人,只有稀疏的星星与我相伴。我记得2012年12月的一个晚上,当我走出办公楼的时候已经快凌晨1点了,那是一个月光如水的冬夜,办公楼前的广场上被月光映照的一片明亮,下台阶快到地面的时候,我踏空了至少两层台阶,结果重重地摔在了地上。我在地上坐了很久,忍着剧痛一瘸一拐地回到了家。几个月以后,我还能感到右脚踝隐隐作痛。但如今看到译著终于要出版的时候,内心十分欣慰,所有的付出都是值得的。本书共有15章,第11章和第14章由吕行和朱玉祥翻译,第15章由李宏毅和朱玉祥翻译,其他章节由朱玉祥翻译,全书由朱玉祥统稿。黄嘉佑教授对全书进行了审校。

我国清末启蒙思想家严复在《天演论》中的“译例言”中讲道:“译事三难:信、达、雅。求其信已大难矣,顾信矣不达,虽译犹不译也,则达尚焉。”“信”指意义不悖原文,即译文要准确,不偏离,不遗漏,也不要随意增减意思;“达”指不拘泥于原文形式,译文通顺明白;“雅”则指译文时选用的词语要得体,追求文章本身的简明优雅。我们虽力求达到严复先生“信、达、雅”的要求,但由于水平有限,难免有些地方未能达到,甚至可能有一些错译之处。因此,特别欢迎广大读者批评指正,无论将来本书是否再版,这对我们来说都是非常有益的。

当然,翻译只是完成了“引进”国外先进教材的过程,只是第一步。下一步,需要深入“消化和吸收”。我们最终的目的是“创新”,也就是自己撰写出高水平的气象统计教材。统计方法在气象科研与业务中虽然应用广泛,但目前为止尚未形成一门完整的气象统计学,这严重制约了统计方法在气象科研和业务中的深入应用和发展。而到底什么是气象统计(或气象统计学)呢?我们尝试给出一个定义:气象统计学是一门研究如何利用数理统计方法,有效地收集、整理和诊断分析带有随机性的气象观测数据和模式数据,以及对所考查的气象问题做出推断或预报预测,直至为采取一定的决策和行动提供依据和建议的气象分支学科。从这个定义可以看出:气象统计的分析对象是观测数据和模式数据,这些数据是随机数据,因此需要用概率统计方法进行分析和研究;气象统计可以对气象问题做诊断分析,也可以做预报预测;气象统计可以用于气象决策服务产品的制作。根据我们的理解,气象统计学的一个基本框架可能包括:(1)气象科研和业务的特点和范围,主要分析气象数据的随机特性和不确定性、气象数据的表示;(2)概率统计的基础知识,包括概率的要素、含意、性质,需要简要介绍概率公理、大数定律、中心极限定理;(3)单变量统计,包括气象资料的经验分布(气象统计量:位置、振幅、分布、相关统计量;图形显示方法:茎叶图、箱线图、柱状图、累积频率分布等)、参数概率分布、频率统计推断、贝叶斯统计推断、统计预报、预报检验、时间序列分析;(4)多变量统计,包括矩阵代数和随机矩阵、多元正态分布、EOF分析、典型相关分析和SVD分析、判别分析和聚类分析;(5)气象预报的价值分析。

本书能够完成翻译并出版,我要感谢的人很多。上面提到名字的各位老师,我都需要表示诚挚的感谢。干部学院的领导给予了大力支持和帮助,在此表示深深的感谢。翻译过程中,多次和Wilks教授沟通交流,对原书中的错误进行订正,得到了他的热情指导和帮助,深表感谢,当然,对所有给予过我帮助的老师、同事、同学、同门、朋友和学生,我都需要表示最真诚的谢意!

朱玉祥

zhuyx@cma.gov.cn

2016年6月

第 3 版前言

当准备《大气科学中的统计方法》第 3 版的时候,我再次尽力满足教师和学生作为教材的需求,同时也适合需要较为全面但并不繁杂的参考书的科研和业务人员。

本书所有的章节已经根据第 2 版进行了更新。这个新版本包括大约 200 篇新参考文献,这些文献的差不多三分之二是 2005 年及以后的。本书最突出的是新增加了关于贝叶斯推断的一章。还包括:关于趋势检验和多重检验的新章节,也有关于自助法的进一步讨论;广义线性模型和集合 MOS 预报发展的新章节;在预报检验一章中新增加了 6 节,反映了在过去 5 年中有关这个重要主题获得的大量新的研究成果。

我要继续感谢很多同事和读者,他们提供了很多建议和意见,并且指出了第 2 版中存在的一些错误,这推动了 this 新版本的改进。勘误表将在 <http://atmos.eas.cornell.edu/~dsw5/3rdEdErrata.pdf> 上收集和维持。

第 2 版前言

自从大约 10 年前,本书的第 1 版出版以来,得到了很多正面的反映,这使我深感欣慰。尽管最初的想法主要是作为教材,但其作为参考书的广泛应用超过了我最初的预期。就第 2 版来说,整本书已经得到了更新,但是很多新材料是针对作为参考书来使用的。最明显的是,关于多元统计的 1 章已经扩充到了目前版本的 6 章。该书仍然很适合作为教材,但是授课教师可能希望对讲授哪些章节有更多的选择。在我自己的教学中,作为本科生天气和气候资料统计的基础课程,我使用第 1 到第 7 章的大部分章节;第 9 到第 14 章在研究生水平上的多元统计课程中讲授。

我没有加入包括适用于特殊的统计,或其他数学软件的很大的数字资料集,并且我尽量避免参考特定的 URLs(网址)。虽然加入更大的资料集能够测试更真实的例子,特别是对多元统计方法来说。但是无法避免的软件改变可能最终使这些内容在某种程度上变得陈旧过时。而且,尽管本书中补充材料的大量附加信息,可以通过简单的搜索在互联网上找到但网址可能被关闭。另外,用手工计算的小例子,即使它们是人为的,但对直接学习程序原理也是有好处的,使得使用软件做真实资料的分析时,不再仅仅是一个黑箱练习。

很多读者指出了以前版本的错误,并且给出了包括其他主题的建议,这些都对这个版本的修订做出了重要贡献。我需要特别感谢 Matt Briggs, Tom Hamill, Ian Jolliffe, Rick Katz, Bob Livezey 和 Jerry Stedinger,因为他们提供了对第 1 版的详细评论,并且评审了第 2 版的初期草稿。正是有了所有的这些贡献,本书才有了重大的改进。

第 1 版前言

本书的目的是作为统计方法应用于大气资料的入门教材。本书的结构基于我在康奈尔大学讲授的课程。这个课程主要针对的是高年级的本科生和研究生新生，讲述的水平针对的对象是这些读者。就关于统计方法在大气资料中使用的很多主题来说，本书只是一个绪论，因为几乎所有主题都可以更长篇和更详细地论述。本教材将提供一些基本统计工具的应用知识，它能够使在其他地方需要用到的更完整和更高级的资料处理变得更容易理解。

本书是假定你已经学完了统计学的初级课程，但是阅读本书之前，最好还是复习好基本的统计学概念。对于那些对大气或其他地球物理资料感兴趣的读者，本书可以作为统计学的中级课程。对于大部分内容来说，超出初级微积分数学背景的内容不做要求。大气科学的背景也不是必需的。很多步骤和方法也可以应用到地球物理的其他学科。

除了作为教材之外，我希望本书对研究人员和面向业务的工作人员也是一本有用的参考书。自从 Hans A. Panofsky 和 Glenn W. Brier 编著的经典教材《统计学在气象上的一些应用》于 1958 年出版以来，统计学在气象上的应用已经发生了很多变化，但一直没有真正适合的可以替代它的好教材。对读者来说，我对大气研究中常用的统计工具的解释，将增加文献的易读性，并且将提高读者对资料集含义的理解。

最后，我要感谢 Rick Katz, Allan Murphy, Art DeGaetano, Richard Cember, Martin Ehrendorfer, Tom Hamill, Matt Briggs 和 Pao-Shin Chu 给予的帮助。他们对初稿富有见地的评论，充分增加了本书表述的明晰性和完整性。

目 录

序一	
序二	
译者序	
第 3 版前言	
第 2 版前言	
第 1 版前言	

第 I 部分 预备知识

第 1 章 统计学的内容	3
1.1 统计学是什么	3
1.2 描述性和推断性统计	3
1.3 关于大气的不确定性	4
第 2 章 概率论回顾	6
2.1 背景	6
2.2 概率的要素	6
2.2.1 事件	6
2.2.2 样本空间	7
2.2.3 概率公理	7
2.3 概率的意义	8
2.3.1 频率解释	8
2.3.2 贝叶斯(主观的)解释	8
2.4 概率的性质	9
2.4.1 域、子集、补集和并集	9
2.4.2 德·摩根律(DeMorgan's Laws)	10
2.4.3 条件概率	11
2.4.4 独立性	11
2.4.5 全概率定理	13
2.4.6 贝叶斯定理	14
2.5 习题	15

第 II 部分 单变量统计

第 3 章 经验分布与探索性资料分析	19
3.1 背景	19
3.1.1 鲁棒性和抗干扰性	19
3.1.2 分位数	20
3.2 数字归纳度量	21
3.2.1 位置	21
3.2.2 离散度	21
3.2.3 对称性	22
3.3 图形归纳方法	23
3.3.1 茎叶显示图	23
3.3.2 箱线图(boxplots)	25
3.3.3 示意图	25
3.3.4 箱线图的其他变异图	27
3.3.5 柱状图(直方图)	28
3.3.6 核密度平滑	29
3.3.7 累积频率分布	33
3.4 重新表示(reexpression)	35
3.4.1 幂变换	35
3.4.2 标准化距平	39
3.5 成对资料的探索技术	41
3.5.1 散点图(Scatterplots)	41
3.5.2 皮尔逊(普通)相关	42
3.5.3 Spearman 秩相关和 Kendall's τ 相关	46
3.5.4 序列相关	47
3.5.5 自相关函数	48
3.6 高维资料的探索性方法	49
3.6.1 星形图	50
3.6.2 符号(glyph)散点图	50
3.6.3 旋转散点图	52
3.6.4 相关矩阵	53
3.6.5 散点图矩阵	54
3.6.6 相关图	55
3.7 习题	57
第 4 章 参数概率分布	59
4.1 背景	59

4.1.1	参数与经验分布	59
4.1.2	什么是参数分布	59
4.1.3	参数与统计量	60
4.1.4	离散与连续分布	60
4.2	离散分布	60
4.2.1	二项分布	60
4.2.2	几何分布	63
4.2.3	负二项分布	64
4.2.4	泊松分布	66
4.3	统计期望	68
4.3.1	随机变量的期望值	68
4.3.2	随机变量函数的期望值	68
4.4	连续分布	70
4.4.1	分布函数与期望值	70
4.4.2	高斯分布	72
4.4.3	伽马分布	78
4.4.4	贝塔分布	84
4.4.5	极值分布	85
4.4.6	混合分布	90
4.5	拟合优度的定性评估	92
4.5.1	拟合的参数分布与资料柱状图的叠加	92
4.5.2	分位数-分位数(Q-Q)图	94
4.6	使用最大似然拟合参数	95
4.6.1	似然函数	95
4.6.2	牛顿-拉夫逊(Newton-Raphson)方法	96
4.6.3	EM 算法	97
4.6.4	最大似然估计的抽样分布	99
4.7	统计模拟	99
4.7.1	均匀随机数生成器	100
4.7.2	通过逆变换进行的非均匀随机数生成	101
4.7.3	借助于拒绝方法的非均匀随机数生成	103
4.7.4	生成高斯随机数的 Box-Muller 方法	104
4.7.5	根据混合分布与核密度估计进行模拟	104
4.8	习题	105
第 5 章 频率统计推断		108
5.1	背景	108
5.1.1	参数与非参数推断	108
5.1.2	抽样分布	108

5.1.3	任何假设检验的基本要素	109
5.1.4	检验水平和 p 值	109
5.1.5	错误类型和检验能力	110
5.1.6	单侧与双侧检验	111
5.1.7	置信区间:转化的假设检验	111
5.2	一些常见的参数检验	114
5.2.1	单样本 t 检验	114
5.2.2	独立情况下平均值差值的检验	115
5.2.3	成对样本平均值差异的检验	117
5.2.4	序列不独立情况下平均值差值的检验	118
5.2.5	拟合优度检验	120
5.2.6	似然比检验	127
5.3	非参数检验	128
5.3.1	对位置的经典非参数检验	128
5.3.2	Mann-Kendall 趋势检验	134
5.3.3	对重新抽样检验的介绍	136
5.3.4	置换(permutation)检验	137
5.3.5	自助法(Bootstrap)	139
5.4	多重性与“场的显著性”	144
5.4.1	独立检验的多重性问题	145
5.4.2	场的显著性和错误发现率	146
5.4.3	场的显著性与空间相关	147
5.5	习题	150
第 6 章	贝叶斯推断	152
6.1	背景	152
6.2	贝叶斯推断的结构	152
6.2.1	连续变量的贝叶斯理论	152
6.2.2	推断和后验分布	155
6.2.3	先验分布的作用	156
6.2.4	预测分布	157
6.3	共轭分布	158
6.3.1	共轭分布的定义	158
6.3.2	二项分布的资料生成过程	158
6.3.3	泊松资料生成过程	161
6.3.4	高斯资料生成过程	164
6.4	困难积分的处理	166
6.4.1	马尔科夫链的蒙特卡罗(MCMC)方法	166
6.4.2	Metropolis-Hastings 算法	167

6.4.3	Gibbs 取样器(Sampler)	170
6.5	习题	172
第7章	统计预报	173
7.1	背景	173
7.2	线性回归	173
7.2.1	简单线性回归	173
7.2.2	残差的分布	175
7.2.3	方差分析表	177
7.2.4	拟合优度量	177
7.2.5	回归系数的抽样分布	179
7.2.6	诊断残差	181
7.2.7	预报区间	185
7.2.8	多元线性回归	187
7.2.9	多元回归中导出的预报因子变量	188
7.3	非线性回归	191
7.3.1	广义线性模型	191
7.3.2	Logistic 回归	191
7.3.3	泊松回归	195
7.4	预报因子的选择	196
7.4.1	为什么精心选择预报因子是重要的	196
7.4.2	筛选预报因子	199
7.4.3	停止准则	201
7.4.4	交叉验证	203
7.5	使用传统统计方法的客观预报	205
7.5.1	经典的统计预报	205
7.5.2	完美预报(PP)和 MOS	207
7.5.3	业务的 MOS 预报	212
7.6	集合预报	214
7.6.1	概率的场预报	214
7.6.2	相空间中的随机动力系统	215
7.6.3	集合预报	217
7.6.4	选择初始集合成员	218
7.6.5	集合平均和集合离散度	219
7.6.6	集合预报信息的图形显示	220
7.6.7	模式误差的影响	227
7.7	集合 MOS	228
7.7.1	为什么集合需要后处理	228
7.7.2	回归方法	229