

水科学技术中的 概率统计方法

Probability and Statistical Methods
in Water Science and Technology

丛树铮 著



科学出版社
www.sciencep.com

P333.6
C959

-8

水科学技术中的 概率统计方法

Probability and Statistical Methods
in Water Science and Technology

丛树铮 著

P333.6
C959

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍了概率统计的基本理论与在水科学技术中常用的近代方法. 概率部分, 包括 Bayes 定理的应用、亚正态分布、分位数变换及多元 Gamma 分布等; 统计部分, 包括参数估计的理论与各种近代方法、假设检验、回归分析、时间序列分析、空间资料分析等在水科学中的应用, 并附有大量实例. 本书还首次介绍了水文集合预报的概念与方法, 以及水文预报检验的价值、理论与方法.

本书可供水文分析、水文预报、水资源规划与管理、气象、气候、水文地质以及其他相关领域的大学生、研究生及科研人员参考使用.

图书在版编目(CIP)数据

水科学技术中的概率统计方法/丛树铮著. —北京: 科学出版社, 2010

ISBN 978-7-03-025586-0

I. 水… II. 丛… III. 水资源-概率统计算法 IV. TV211-05

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 165083 号

责任编辑: 罗 吉 朱海燕 于宏丽 / 责任校对: 包志虹

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 1 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/16

2010 年 1 月第一次印刷 印张: 35

印数: 1—3 000 字数: 800 000

定价: 86.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈科印〉)

谨以此书献给

母亲李淑华女士 父亲丛道一先生

及老师黄万里教授

代 序

在中外近代历史上,有两个人是我最尊敬的。一位是我的老师黄万里,另一位是世界著名科学家爱因斯坦。我之所以尊敬他们,不仅是由于他们在科学上和事业上的成就,而且更是由于他们高尚的品格。在我看来,他们堪称知识分子的精神楷模。在此,谨摘录他们的一些言论与事迹片段,作为代序,奉献给读者,特别是年轻的学生。

黄万里(1911~2001)是蜚声中外的水利、水文学家。为了国家和人民的利益他一生锲而不舍地追求真理,只说真话,不说假话。他鄙视那种为了谋取私利而歪曲真理、损害公益的可耻行为。他在最后病重时对自己的学生说:“知识分子,特别是决策者的错误认知,是最大的祸国殃民。我们受之于民的太多了,要竭尽自己所能报效国家。”^①

爱因斯坦(1879~1955),世界著名科学家。他在《我的世界观》^②(*the world as I see it* ^③)中写到:“我每天上百次地提醒自己:我的精神生活和物质生活都依靠着别人(包括生者和死者)的劳动,我必须尽力以同样的分量来报偿我所领受了的和至今还在领受着的东西。我强烈地向往着简朴的生活。”“我也相信,简单淳朴的生活,无论在身体上还是在精神上,对每个人都是有益的。”“人们所努力追求的庸俗的目标——财产、虚荣与奢侈的生活,我总觉得都是可鄙的。”他远离权势,把一生献给了科学和反法西斯及反战事业。1952年他拒绝了以色列请他担任总统的邀请。他的最后时日是这样度过的:“1955年4月13日,动脉瘤破裂。4月15日进入 Princeton 医院。4月16日儿子 Hans Albert 从 Berkeley 来到 Princeton。4月17日,他打电话给 Helen Dukas,要求给他书写的工具以及他最近所作的计算手稿。4月18日凌晨 1:15 去世。他的遗体于当日下午 4 时于 Trenton 火化,骨灰撒落于未予透露的地方。”^④

相信他们的精神会后继有人。

① 赵诚. 追寻黄万里. 上海:上海出版社,2004.

② 赵中立,许良英. 纪念爱因斯坦译文集. 上海:上海科学技术出版社,1979.

③ Ideas and Opinions. Albert Einstein. Based on Mein Weltbild, edited by Carl Seelig, and other sources, New Translations and Revisions, by Sonja Bargmann. The modern library, New York, 1994.

④ Abraham Pais: ‘Subtle is the Lord...’, The Science and Life of Albert Einstein, Oxford University Press, 1982.

前 言

1981年6月,水利出版社出版了由华东水利学院(现河海大学)主编的《水文学的概率统计基础》一书(以下简称《基础》)。作为该书的主编人,曾想修改、增订,惜未获得时机。1988年,本人赴美。后在美国大气海洋总署(NOAA)下属天气局(NWS)所属的水文局(OHD)工作,于2006年7月退休。在此期间,学习和使用了多种概率统计方法。利用退休后的三年时间,专门编写了此书,以供国内学者、工程技术人员参考。同时亦可供大学教师、研究生以及本科生作为参考书。本书的部分内容曾参考或取材于《基础》的有关部分,在此谨向有关作者表示感谢。其余内容皆为重新编写,尤其最后三章,为以前所未曾涉及。

水文、气象现象具有很大的不确定性,因此与水有关的水文、气象、气候方面的现代研究,有很大部分是涉及或针对不确定性的研究和处理的。这无疑都需要使用概率统计方法。与此同时,作者也注意到,由于问题的复杂性,在应用概率统计方法的历史中,也有不正确应用的实例。这正反两方面的事实使作者感到有必要写一本专著,首先使读者能建立严谨、正确的概率统计概念,然后能够掌握各种现代的概率统计方法,从而能在应用中正确使用,并在应用及研究中予以发展、创新,以造福社会。

本书的出版主要由河海大学“211工程”项目的资助,并得到前任校长张长宽教授、水文水资源学院院长任立良教授、副院长陈元芳教授的热心支持。同时还得到南京水利科学研究院出版基金的赞助,并得到该院院长张建云教授、水文水资源研究所所长刘九夫教授级高工的热心支持。另外,应作者要求,河海大学梁忠民教授仔细阅读了全书,并提出了许多建议,使本书得到不少改进。河海大学研究生许睢先生、徐蛟先生帮助输入本书部分文稿。在此一并向他们表示诚挚的感谢!

最后,感谢我的夫人庄一鸽,她的支持与鼓励使本书由构想变成了现实。

由于作者水平所限,书中如有不妥之处,盼读者能予指出(电子邮箱:szcong2@gmail.com),以期能再版时改正。在此谨向各位诚致谢意。

丛树铮

2009年7月

绪 言

水的重要性日益明显。一方面, 水是人类生存的必要条件, 无水即无生命。可水的数量是有限的, 特别对人口众多的中国更是如此。要对有限的水资源作有效的利用, 我们就必须对水的量和质做深入研究。另一方面, 洪涝、干旱又对人民的生命财产造成危害, 因此我们对水在时间上、空间上的分布变化规律必须进行研究。这可以说是一项万世不朽之业。

“天有不测风云。”我们的祖先早就知道水利、天气、气候现象, 具有不确定性。关于必然性、偶然性 (不确定性、随机性) 的概念, 哲学家们和理论物理学家们仍在争论、研究和探讨 (Peat, 2002)。但 20 世纪 60 年代提出的混沌理论 (Lorenz, 1993), 无疑是一个巨大进展。它使我们知道, 天气预报的不确定性 (随机性) 却源于表述大气过程的方程组的确定性。粗略地说, 这是由于描述大气运动的这组非线性、确定性的方程, 对系统的初始条件非常敏感。而大气的初始条件, 由于其空间上的广袤, 我们无法得到准确的答案。从而不可能对天气做出长期的准确预报。地球上的淡水, 都源于降水, 而降水又是天气现象的重要因素。因此, 混沌理论使我们对水在时间、空间分配上的不确定性有了进一步了解。

概率论是数学的一个分支, 专门研究随机的现象, 并因此与现实世界有密切的联系。广义地说, 统计学是“关于收集、分析和表述资料的知识领域”(McGraw-Hill, 1982)。但就很重要的方面来说, 统计学可视为概率论应用的一个领域。在水科学技术中, 我们应用概率统计方法, 就是要对不确定性进行估计、定量, 以做出推论和预测。

水科学技术中应用概率统计方法的一个重要实例是通过洪水 (暴雨) 的频率分析, 来研究具有一定超过频率的洪水 (暴雨) 值, 以此为工程措施的设计提供依据。这无疑是具有重要意义的。但随着经济和科学技术的发展, 水科学技术中应用概率统计方法的重点将转移到对水资源及水资源工程、措施的管理运用方面, 即通过对水的预报、预测来获取最大的运用效益以及最大限度地减少灾害。在水文预报的领域内, 已广泛地使用概率统计方法。这包括近年来刚发展起来的集合预报 (ensemble forecast)。这方面的经济社会价值, 将会日益明显。因此, 本书特设两章分别介绍集合预报 (第 12 章) 及预报检验 (第 13 章) 的内容。这两个专题的内容, 在美国水文界也正处于发展阶段。特别是集合预报, 应该说, 其内容并非都完全成熟。但作者认为, 每一新生学科, 在初始阶段, 都具有这种特点。通过这种介绍, 可使国内的专家学者及时了解这方面的情况, 从而在发展集合预报、预报检验的理论、技术及应用方面, 作出贡献。

另外, 空间资料的统计分析, 在地学领域有很多应用与发展。这类方法, 在美国水文界也有很多应用。但在国内的水科学技术界应用尚不普及, 因此也辟专章 (第 11 章) 予以介绍。

本书其余各章简述如下: 第 1 章, 集合概念, 为全书的基础。这在一般的概率统计书中并不多见。作者认为, 这是掌握全书的基础。第 2~5 章为概率统计的传统内容, 但增加了多元亚正态分布、正态分位数变换、二元 gamma 分布以及 Wishart 分布等新近内容。

第 6 章, 参数估计的理论与方法, 强调参数估计的理论, 也介绍了现代常用的各种方法. 第 7 章, 假设检验, 强调了假设检验的理论, 着重介绍了两种错误的概念, 然后再介绍常用的一些方法. 第 8 章, 回归分析, 除一般回归分析的概念与方法外, 还介绍了它在水文气象预报中应用的情况. 第 9 章介绍了时间序列的统计分析, 包括时域分析及频域分析两个方面, 强调了时间序列在水科学技术中的应用. 第 10 章, 统计试验方法, 一般统计书中并不常见, 但这是研究工作中一个有力的工具.

本书虽力求题材广泛, 但仍有许多水科学技术中有用的概率统计方法本书未能涉及. 如非参数方法、资料同化 (data assimilation)、Kalman 滤波以及 Wavelet 等. 有需要的读者可参考有关专著.

最后, 应该说明, 由于本书的性质属于应用数学范畴, 读者对象为水科学技术界的科学家、工程师、教师与学生. 因此书中的数学陈述在许多情况下并不具备纯数学的严谨性. 作者认为, 就应用角度而言, 概率统计方法的重要方面都是和主题的概念 (idea) 而非技术细节相关联的. 因此, 本书的重点是介绍概率论与数理统计的基本概念与原理, 只有牢固地掌握了这些内容, 才有可能在工作中正确、灵活和创造性地加以运用.

常用符号一览表

符 号	涵 义	符 号	涵 义
$\Rightarrow$	蕴含	$LN(\mu, \sigma^2)$	参数为 μ, σ^2 的对数正态分布
$\Leftrightarrow$	相互蕴含、等价	$LP3(\alpha, \beta, \tau)$	参数为 α, β, τ 的对数 P-III型分布
$\rightarrow$	收敛于	$N(\mu, \sigma^2)$	参数为 μ, σ^2 的正态分布的分布函数
$\sim$	服从某种分布, 或渐近等于	$n(\mu, \sigma^2)$	参数为 μ 与 σ^2 的正态分布的密度函数
$\mu = E(X)$	期望值	$N_k(\mu, \Sigma)$	均值为 μ 方差为 Σ 的 k 元正态分布的分布函数
$\mu_k = E((X - E(X))^k)$	k 阶中心矩, $k \geq 0$	$n(\mu, \Sigma)$	参数为 μ 与 Σ 的正态分布的密度函数
$\Gamma(x)$	Gamma 函数	$ARMA(p, q)$	自回归移动平均混合模型
$m_k = E(X^k)$	k 阶原点矩	$P(\lambda)$	参数为 λ 的泊松分布
$\mathbf{X}, \mathbf{x}$	列向量, 矩阵	$ARIMA(p, d, q)$	整合自回归移动平均混合模型
$\sigma^2 = \mu_2$	方差	$P3(\alpha, \beta, \tau)$	参数为 α, β, τ 的 P-III型分布
$\text{var}(X) = \mu_2$	方差	$\mathbf{X}^T, \mathbf{x}^T$	转置矩阵
$C_v = \frac{\sigma}{E(X)}$	变异系数, 变差系数	$t(n)$	自由度为 n 的学生氏 t 分布
$C_s = \frac{\mu_3}{\sigma^3}$	偏态系数	$\mathbf{R}^n$	n 维实数空间
$AR(p)$	p 阶自回归模型	$U[a, b]$	区间 $[a, b]$ 上的均匀分布
iid	独立同分布	$\chi^2(n)$	自由度为 n 的 χ^2 分布
$b(1, p)$	参数为 p 的伯努利分布	df	分布函数
$b(n, p)$	参数为 n, p 的二项分布	d.f.	自由度
$B(\alpha, \beta)$	参数为 α, β 的 Beta 分布	MPARIMA	复合周期性整合的自回归移动平均
$C(\mu, \theta)$	参数为 μ, θ 的柯西分布	$(p, d, q) \times (P, D, Q)$	混合模型
$F(m, n)$	自由度为 m, n 的 F 分布	mgf	矩母函数
$G(\alpha, \beta)$	参数为 α, β 的 Gamma 分布	pdf	概率密度函数
$MA(q)$	q 阶移动平均模型	pmf	概率质量函数
		rv	随机变量

目 录

代序

前言

绪言

常用符号一览表

第 1 章 集合概念	1
1.1 集合的一般性质	1
1.1.1 元素与集合 (或简称为集)	1
1.1.2 有限集合与无限集合	1
1.1.3 子集与空间	2
1.1.4 函数与集合的表示	3
1.1.5 集合的运算	5
1.1.6 集列 (或集合序列)	8
1.1.7 单调集列	9
1.1.8 集合的完全可加族	10
1.2 直线上的点集 (或实数的集合)	11
1.2.1 区间	11
1.2.2 $\mathbf{R}^1$ 中集合的各种特性	12
1.2.3 Borel 集	13
1.2.4 $\mathbf{R}^n$ 中的集合	14
1.3 $\mathbf{R}^1$ 中的非负可加集函数	15
1.3.1 集函数与点函数	15
1.3.2 有界集函数	18
1.3.3 分布	19
第 2 章 事件与概率	20
2.1 试验、事件与样本空间	20
2.1.1 基本事件与复合事件	21
2.1.2 样本空间	22
2.1.3 事件的运算	24
2.1.4 事件之间的关系	25
2.2 概率的意义	26
2.2.1 概率的古典解释	27
2.2.2 概率的统计解释	27
2.2.3 概率的 Bayes 解释	28
2.2.4 概率的公理化结构 —— 概率空间	28

2.3 边际概率与条件概率	29
2.3.1 边际概率	29
2.3.2 条件概率	30
2.4 概率的性质	31
2.4.1 不可能事件的概率为零 ($P(\emptyset) = 0$)	31
2.4.2 互斥事件的加法定理	31
2.4.3 若 $A_1 \subset A_2$, 则有 $P(A_2 - A_1) = P(A_2) - P(A_1)$	31
2.4.4 对任意事件 $A_1 \in \mathcal{F}, A_2 \in \mathcal{F}$ 的情况	31
2.4.5 一般事件的加法原理	32
2.4.6 连续性定理	33
2.5 概率的基本运算法则	34
2.5.1 概率的乘法定理	34
2.5.2 全概率公式	34
2.5.3 Bayes 定理	35
2.5.4 贝叶斯 (Bayes) 推断简介	36
2.5.5 独立性	38
2.6 独立重复试验模型 (或伯努利概率)	39
第 3 章 随机变量及其分布	41
3.1 一元随机变量及其分布	41
3.1.1 一元随机变量	41
3.1.2 一元随机变量的分布函数	42
3.1.3 分布函数的分解	43
3.1.4 离散型随机变量	44
3.1.5 连续型随机变量	48
3.1.6 广义概率密度的概念	52
3.1.7 离散-连续的混合型随机变量	52
3.2 多元随机变量及其分布	53
3.2.1 n 元随机变量及其分布函数	53
3.2.2 分布函数的性质	54
3.2.3 概率函数和概率密度函数	55
3.2.4 边际分布、边际概率、边际密度	56
3.2.5 条件分布函数及条件概率质量函数 pmf 和条件概率密度函数 pdf	58
3.2.6 独立随机变量	61
3.3 随机变量的函数及其分布	65
3.3.1 一元随机变量的函数及其分布	65
3.3.2 多元随机变量函数的分布	71
3.3.3 二元变量的亚正态分布及正态分位数变换 NQT	81
第 4 章 随机变量的数字特征	84
4.1 数学期望	84

4.1.1 一元随机变量的数学期望	84
4.1.2 多元随机变量的数学期望	89
4.1.3 条件数学期望 (简称条件期望值)	90
4.2 众数与中位数	95
4.2.1 众数 (mode)	95
4.2.2 中位数 (median)	95
4.3 方差	96
4.3.1 一元随机变量的方差	96
4.3.2 多元随机变量的方差	100
4.4 矩	106
4.5 矩母函数	107
4.6 随机序列的收敛与大数定律及中心极限定理	110
4.6.1 随机序列的收敛概念	110
4.6.2 大数定律	111
4.6.3 中心极限定理	112
第 5 章 常用概率分布	114
5.1 一维离散型分布	114
5.1.1 一点 (或称退化) 分布	114
5.1.2 两点分布	115
5.1.3 n 点上的均匀分布	116
5.1.4 二项分布	117
5.1.5 泊松分布 (Poisson 分布)	118
5.2 一维连续型分布	119
5.2.1 均匀分布 (或矩形分布)	119
5.2.2 正态分布 (又称高斯分布)	121
5.2.3 Gamma 分布	124
5.2.4 Pearson III 型分布	128
5.2.5 指数分布	129
5.2.6 对数正态分布	129
5.2.7 韦布尔 (Weibull) 分布	132
5.2.8 极值分布 (又称 Gumbel 分布)	133
5.2.9 对数 Pearson III 分布, 记为 $LP3(\alpha, \beta, \tau)$	134
5.2.10 几种抽样分布简介	135
5.2.11 其他分布	138
5.3 多维连续分布	139
5.3.1 二维正态分布	139
5.3.2 多维正态分布	141
5.3.3 n 元对数正态分布	142
5.3.4 二维 Gamma 分布	145

5.3.5 Wishart 分布	148
第 6 章 参数估计的理论与方法	151
6.1 前言	151
6.2 样本概念与抽样分布	151
6.2.1 总体和样本	151
6.2.2 经验分布函数 (或样本分布函数)	152
6.2.3 作为 n 元随机变量的样本及其分布	154
6.2.4 抽样分布的概念及抽样分布的数字特征	155
6.2.5 多元随机变量函数的数字特征的近似公式	158
6.2.6 几个统计量的抽样分布	161
6.3 参数估计的理论与方法	170
6.3.1 基本概念	170
6.3.2 估计量好坏的标准	171
6.3.3 估计方法	178
6.4 洪水频率分析的研究概况	188
6.4.1 概述	188
6.4.2 我国 20 世纪 80 年代洪水频率分析的研究概况	192
6.4.3 美国近代研究概况简介	203
6.4.4 期望概率与破坏概率	210
6.5 设计暴雨洪水问题展望	214
第 7 章 假设检验	216
7.1 概述	216
7.2 基本概念与定义	216
7.2.1 定义与例子	216
7.2.2 假设检验的基本概念	217
7.2.3 信度 α 的选择及 $\alpha \sim \beta$ 关系	220
7.2.4 基本概念的具体说明	221
7.3 对于简单 H_1 关于简单 H_0 的检验	224
7.4 对于复合 H_1 关于简单 H_0 的检验	227
7.5 对于复合 H_1 关于复合 H_0 的检验 —— 似然比检验	227
7.5.1 t 检验	229
7.5.2 两个相互独立正态变量平均数相等的检验	231
7.5.3 χ^2 检验	234
7.5.4 F 检验	235
7.5.5 零相关检验	236
7.6 拟合优度检验	238
7.6.1 χ^2 检验	239
7.6.2 Kolmogorov-Smirnov 检验	245
7.6.3 列联表检验	247

7.7 非参数检验简介	252
7.7.1 关于位置 (平均值) 的古典非参数检验	252
7.7.2 重复抽样检验	256
7.8 方差分析简介	259
7.8.1 ANOVA 简介	259
7.8.2 MANOVA 简介	261
第 8 章 回归分析	267
8.1 概述	267
8.2 一元线性回归	268
8.2.1 回归分析概念	268
8.2.2 一元线性回归的数学模型	269
8.2.3 回归系数的最小二乘估计	270
8.2.4 回归方程的显著性检验	275
8.2.5 回归方程的误差	279
8.2.6 回归直线在水文分析中的一种应用	282
8.3 多元线性回归	283
8.3.1 多元线性回归的数学模型	283
8.3.2 正规方程组及其解	284
8.3.3 多元线性回归数学模型的其他形式	290
8.3.4 回归方程的显著性检验	298
8.3.5 回归系数的显著性检验	302
8.3.6 回归方程的误差	306
8.4 变量的选择	309
8.4.1 概述	309
8.4.2 几种变量选择的方法	310
8.5 回归分析在天气预报中的应用简介	321
8.5.1 交互检验	321
8.5.2 完全预报法及 MOS 预报法	321
第 9 章 时间序列分析	325
9.1 随机过程与时间序列的概念	325
9.1.1 随机过程的一个现实 (时间序列) 与随机过程的总体	325
9.1.2 随机过程 $X(t)$ 的概率统计特性	326
9.1.3 平稳性的概念	327
9.1.4 遍历性假定 (或各态历经假定)	328
9.1.5 时域分析与频域分析	328
9.1.6 离散与连续及表示符号	329
9.2 离散时间序列 X_t 的时域分析	329
9.2.1 马尔可夫链简介	329
9.2.2 两状态的一阶齐次马尔可夫链	332

9.3 连续时间序列的时域分析	337
9.3.1 纯随机过程或白噪声过程 a_t	337
9.3.2 几种简单的算子	338
9.3.3 线性滤波模型	339
9.3.4 自回归模型 $AR(p)$	339
9.3.5 移动平均模型 $MA(q)$	348
9.3.6 自回归与移动平均混合模型 $ARMA(p, q)$	350
9.3.7 整合的自回归移动平均模型 $ARIMA(p, d, q)$	351
9.3.8 复合周期性整合的自回归移动平均模型 $MPARIMA(p, d, q) \times (P, D, Q)$	352
9.3.9 调和过程	359
9.3.10 参数齐备原则	361
9.4 时间序列的频域分析	361
9.4.1 平稳随机过程的谱表示及其功率谱	361
9.4.2 自协方差函数以及自相关函数与谱密度的关系	365
9.4.3 正规化的功率谱	366
9.4.4 时间序列的功率谱	367
9.4.5 几个简单时间序列模型的谱例	369
9.4.6 周期图 (或傅里叶线谱) 简介	371
9.5 本章结语	375
第 10 章 统计试验方法	376
10.1 概述	376
10.2 随机数的产生	378
10.2.1 产生随机数的一般方法	378
10.2.2 产生随机数的线性同余法	379
10.2.3 复递归生成器	382
10.3 随机变量、随机向量与随机过程的抽样	382
10.3.1 随机变量的抽样	382
10.3.2 随机向量的抽样	392
10.3.3 随机过程的模拟	397
10.4 随机数的检验	407
10.4.1 参数检验	407
10.4.2 均匀性检验	408
10.4.3 独立性检验	409
10.4.4 其他检验	410
10.4.5 检验的一般结果与检验的局限性	410
10.5 降低方差的概念	410
10.6 统计试验方法在水文学中的一些应用	415
10.6.1 概述	415
10.6.2 在回归分析方面的应用	415

10.6.3	在水库设计方面的应用	417
10.6.4	在研究参数估计方法及分布类型选择方面的应用	419
第 11 章	空间资料的统计分析	420
11.1	前言	420
11.2	SRF 的概念	421
11.3	SRF 的相关理论	423
11.4	SRF 的估计	425
11.4.1	估计问题的一般说明	425
11.4.2	无约束的 Wiener-Kolmogorov 估计	426
11.4.3	有约束的 Wiener-Kolmogorov 估计及普通克里金估计	428
11.4.4	简单克里金估计	429
11.4.5	通用克里金估计	430
11.4.6	距离反比法	432
11.4.7	随机场估计的一个应用实例及讨论	438
11.5	空间随机场的模拟	443
11.5.1	转动带方法	444
11.5.2	随机场模拟的一个应用实例	447
第 12 章	水文集合预报	451
12.1	引言	451
12.2	长期流量预报 (extended streamflow prediction, ESP)	453
12.2.1	ESP 的基本思路	453
12.2.2	美国天气局河流预报系统 NWSRFS 中 ESP 的程序结构	454
12.2.3	NWSRFS 中 ESP 程序的功能	456
12.3	集合预报的概念	458
12.4	短期水文集合预报的现状	460
12.5	短期水文集合预报的改进尝试	461
12.5.1	现行方法的内容与问题	461
12.5.2	混合型二维分布的有关公式	462
12.5.3	在给定 $X = x$ 下 Y 的条件 CDF $\Phi_{Y x}(y)$ 的估计	464
12.6	水文集合预报试验 —— HEPEx	469
12.7	本章结语	471
第 13 章	预报的检验	472
13.1	引言	472
13.2	基本概念	472
13.2.1	预报值与观测值的联合分布	472
13.2.2	表示预报性能的一些数量指标	474
13.2.3	预报技能	475
13.3	离散预报量的分类预报的检验	476
13.3.1	列联表	476

13.3.2	二元事件分类预报的精度	477
13.3.3	列联表的技能指标	478
13.3.4	相对操作特征曲线	479
13.4	连续预报量的预报检验	482
13.4.1	前言	482
13.4.2	基于一阶矩的检验指标	483
13.4.3	基于二阶矩的检验指标	484
13.4.4	依据累积频率的评分	490
13.5	概率预报的检验	494
13.5.1	引言	494
13.5.2	两元事件的概率预报	494
13.5.3	布赖尔评分 (简记为 BS)	495
13.5.4	布赖尔评分的代数分解	495
13.5.5	特征图	497
13.5.6	可靠性图	498
13.5.7	排序概率分 RPS	499
13.6	长期流量预报回顾检验的一个实例	502
13.6.1	回顾性的 ESP	502
13.6.2	采用的几种检验统计量	508
参考文献		510
常用专业词汇英中文对照		518
附表 (引自华东水利学院, 1981 并作了校正)		521
附表 1	标准正态分布纵坐标表	521
附表 2	标准正态分布概率表	523
附表 3	Pearson III型分布 Φ_p 值表	525
附表 4	对数正态分布的离均系数 Φ_p 值表	527
附表 5	χ^2 分布表	529
附表 6	t 分布表	531
附表 7	F 分布表	532
附表 8	相关系数检验表	538