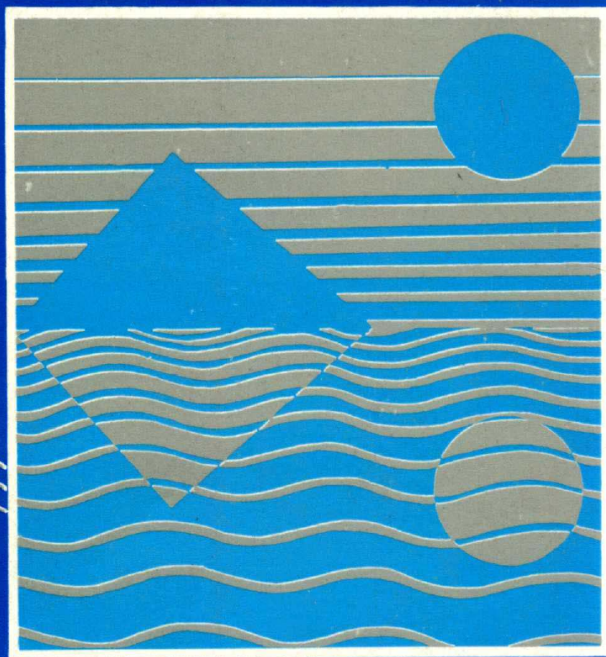


王本德 编著



水文中长期预报 模糊数学方法

大连理工大学出版社

(辽)新登字 16 号

内 容 简 介

本书较系统地论述了水库及水利系统控制运用所需要的水文中长期预报方法。全书共分四章,一至三章概要地介绍应用较普遍的传统方法,即数理统计法、大气与非大气因子分析法。第四章重点阐述近十几年发展起来的水文气象要素中长期预报模糊数学方法。各章节皆举算例,便于自学。

书后还附录模糊数学方法的部分程序及曾公开发布的大气环流特征、太阳黑子相对数等资料,供读者编方案选因子时参考。

本书是水力发电工程专业,水文水资源专业水资源开发利用、水能利用与防洪研究方向的硕士生专业课教材,亦可供从事水利水电,水资源系统规划、设计、运行等部门的技术人员及高等院校有关专业的师生阅读和参考,还可供水文、气象台站预报员阅读和参考。

水文中长期预报模糊数学方法

Shuiwen Zhongchangqiyubao Mohushuxuefangfa

王本德 编著

大连理工大学出版社出版发行 (邮政编码:116024)

大连海运学院印刷厂印刷

开本:787×1092 1/32 印张:8 $\frac{3}{4}$ 字数:178千字

1993年4月第1版 1993年4月第1次印刷

印数:1—1500册

责任编辑:刘杰

封面设计:羊戈

责任校对:杜祖诚

ISBN 7-5611-0562-2/TV·14 定价:2.46元

前 言

“凡事预则立，不预则废”。水资源系统及与水文气象有关联的各生产部门，若要充分合理地利用水资源，减少灾害损失，使国民经济有计划、稳定、协调发展，则应当重视研究使用水文气象中长期预报。就水电站水库及水利系统控制运用而言，一定精度的水文中长期预报，是经济合理调度的重要或参考性依据，是研究实施预报调度方式的基础。长中短期预报相结合进行调度，既可减少不蓄电能损失和降低破坏深度，又可增加季节性电能和减少弃水。年初和汛前，如有较准确的长期旱涝趋势预报，则可争取一定程度的抗灾主动权，提高防汛抗旱物资利用率。另外，水库及河道水情、冰情中长期预报，不但能增强航运计划性，提高运输效益，而且还可减少凌害。可见，研究应用水文中长期预报的意义是重大的。

实际上，待预报的水文要素成因十分复杂，受天文、气象、自然地理特性和人类活动等因素影响，既有确定性规律，又有随机性和模糊性规律。由于观测技术落后，资料短缺，理论不成熟，至今尚未真正掌握上述规律，因此水文要素中长期预报水平较低。方法虽然甚多，却没有一种得到充分论证和公认的良好方法，基本是从近似的因果关系入手，通过寻求前期因子与预报要素之间的相关性和统计特性进行预报。这种状况远远不能满足水库及水利系统控制运用和各需求部门计划生产

的要求。

为扭转这一被动局面,专家们始终不渝地探索新理论和方法。如栾巨庆的电磁感应假说及其行星对应区长期天气预报方法^[34];基于模糊集合论,能较客观地描述水文气象要素划分过程的中介过渡性和预报人员模糊识别经验的中长期预报模糊数学方法^[1-9,44,51-63,65]等。但是,现有教材并没有论述反映水文现象模糊性规律的模糊数学新方法等,只是较详细地介绍了描述随机性规律的数理统计法,概要地叙述一些力图揭示确定性规律的大气与非大气因子分析法,二者统称传统方法。

本书是在原水资源开发利用、水能利用与防洪研究方向硕士生专业课“水库控制运用”第一部分“水库控制运用专题”讲义基础上,经补充近十多年我们研究室关于模糊数学方法的研究成果而改写成。主要内容分两大部分,第一部分概要介绍传统方法;第二部分较详细、系统地阐述模糊识别,模糊相关关系,模糊聚类分析,模糊综合评判,模糊推理模式法等。这样编排:①从水文现象完整特性(确定、随机、模糊)的角度,系统地论述预报理论与方法;②突出重点介绍模糊数学方法,但决不是否定传统方法,而是取长补短;③方便于原所学专业有差异的硕士生和工程技术人员阅读。基于上述几点,为了反映本学科新研究成果和特色,将书改名为“水文中长期预报模糊数学方法”。

本书的特点是:将揭示水文气象要素本质规律的气象学、水文学、天文地理学、概率论与统计学、模糊集合论融为一体,第一次把传统方法与具有方向性的模糊数学新方法作一完整体系论述,每种方法都举有算例,附有短评,便于自学,有助于

深入研究与应用。

“概率论与数理统计”、“矩阵分析”、“模糊数学”等是学习本书的基础知识,请参阅专著^[6-15,17-26]。

在编著中,承蒙陈守煜教授与同事们的大力帮助,提供了许多有价值的资料,书中第四章六至八节的部分素材及附录一源程序 2、3 是周惠成博士提供的,在此表示衷心谢意。

王本德

1992 年 2 月于大连

目 录

前 言

第一章 数理统计法	1
第一节 概述.....	1
第二节 历史演变法.....	2
第三节 周期叠加外推法.....	5
第四节 平稳时间序列外推法	15
第五节 多元线性回归法	23
第六节 逐步回归法	40
第七节 多维时间序列外推法	51
第二章 大气因子分析法	64
第一节 概述	64
第二节 天气型分析基础上的指标相关法	66
第三节 大气环流特征指标相关法	69
第四节 海温与青藏高原热源分析法	78
第三章 非大气因子分析法	87
第一节 概述	87
第二节 考虑太阳活动规律的方法	88
第三节 考虑地球运动规律的方法	96
第四节 考虑星际引力的方法.....	107
第四章 模糊数学方法	114
第一节 模糊数学方法的实践基础.....	114

第二节	模糊模式识别法	118
第三节	模糊相关关系法	126
第四节	模糊聚类分析法	132
第五节	模糊综合评判法	157
第六节	多因子模糊推理模式预报法	164
第七节	单要素预报的模糊推理模式法	183
第八节	水文要素预报的权综合特征系数模糊 推理法	199
第九节	模糊数学预报方法的研究方向	209
附录一	部分模糊数学方法源程序	214
1.	模糊软划分聚类分析： 源程序,输入与输出文件举例	214
2.	水文要素多因子相关分级预报模糊推理模式法： 源程序,输入与输出文件举例	221
3.	水文单要素分级预报模糊推理模式法:源程序, 输入与输出文件举例	227
附录二	部分气象资料与计算用表	234
1.	部分环流特征及非大气因子表	234
2.	F 、 t 、 χ^2 分布表	254
参考文献		264

第一章 数理统计法

第一节 概 述

水文要素预见期，一般按河流水文特性和水库调节性能，国民经济计划需要区分。一次降雨径流过程的预报通称短期预报；一旬或一个月的要素预报称中期预报；预见期大于一个月至一年的称为长期预报；预见期大于一年以上称为超长期预报。这种划分并非是绝对的。

目前，普遍开展的水文要素中长期预报的内容有：河道关键断面最大流量、最高水位及最枯流量、最低水位；入库径流量和库水位，如年、月、旬平均径流量和最高最低库水位，汛期、桃花汛、梅雨季、枯水季径流量；冰情预报等。

水文要素中长期预报方法，现阶段基本分大气与非大气因子分析法、数理统计法和模糊数学法三大类，分别侧重于寻求水文要素长期变化的确定性、随机性和模糊性规律，各自依据的理论是水文气象与天文地理学、概率论与数理统计原理、模糊集合论与模糊水文学。

数理统计法是一种常用的，可作出定量预报的主要方法。它依据大量历史资料，应用概率论与数理统计原理探求水文要素历史变化的统计规律，进行预报。按制作预报依据的资

料,可细分两类:一是单要素预报,即分析要素本身时序变化规律进行预报,如历史演变法、周期叠加、平稳时间序列、趋势分析及随机函数的典型分解等;二是多因子综合预报,即分析要素与前期多因子之间的统计相关关系,然后用数理统计法加以综合,进行预报,如多元回归分析、逐步回归分析及多维时间序列等。

本章将概要论述各方法基本思想、数学模型建立、参数确定与检验方法等。

第二节 历史演变法

历史演变法,由气象专家杨鉴初 50 年代首先提出的,是用某测站、某一水文气象要素的时序演变曲线的外形统计特征作中长期预报的方法。方法的基本思想是:任一水文气象要素的长期历史实测值,全面地反映了这一要素的时序变化规律。尽管目前还不能辨认影响要素变化的内因与外因或影响程度,但是诸因素的综合影响却已全面地融汇于要素的时序变化之中,若能找出该要素历史变化规律,便可用它进行预报。

经分析统计大量的水文气象要素历史演变曲线,发现有五个基本规律;即持续性、相似性、周期性、最大最小可能性和转折点。

持续性。是指水文气象要素升降趋势的持久程度,即连续上升或下降,升降超出距平某一数值后将改变原趋势的特性。图 1-1 是辽宁省大伙房水库历年年平均流量变化过程。经分析具有如下特性:升两年后必下降;上升到 $80\text{m}^3/\text{s}$ 以上必然

下降到平均线以下；连续下降不超过四年；下降到 $30\text{m}^3/\text{s}$ 以下必上升。

相似性。是指某一时期和另一时期水文气象要素变化趋势的相似性。图 1-1 中 1937 年~1943 年、1952 年~1958 年、1965 年~1970 年，连续上升两年后连降三年的变化趋势很相似；1943 年~1946 年、1952~1955 年、1958~1961 年、1937~1940 年、1965~1968 年，连续上升两年降一年的变化趋势很相似。

周期性。表示经过一定时间间隔，同样变化再行出现的特征。相似性是不要求有一定时间间隔的。如图 1-1，不仅具有四年或七年丰枯周期，并且还有十年周期特枯的规律，例如 1948 年、1958 年、1968 年和 1978 年都是比较枯水的年份。

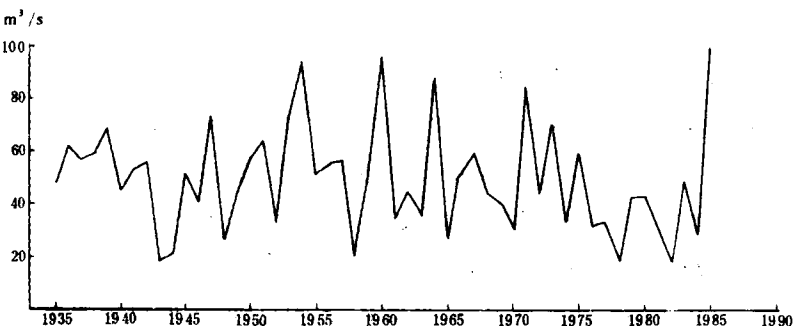


图 1-1 大伙房入库年平均流量历年演变过程线

最大最小可能性。指水文气象要素经常出现的范围或年上升、下降的极限的幅度。如图 1-1 中年平均流量，最大可能范围在 $40\sim 70\text{m}^3/\text{s}$ ，超过此限度的情况可能性最小，如小于 $17\text{m}^3/\text{s}$ 或大于 $95\text{m}^3/\text{s}$ 的可能性最小。

转折点。指历史变化中,在某一期间很明显的特征经过转折点 after 有所改变,出现新的特征。往往在几十年以上才出现一次转折。图 1-1 中 1970 年前具有上升两年降一年的明显特征,而后却变为升一年降一年的特征,称 1970 年为转折点。

利用历史演变法进行中长期预报的步骤:

1. 整理待预报的水文气象要素的历史资料,绘制如图 1-1 类型的历史演变过程线,可标出均值等特征线。要求资料年数大于 30 年,越多越好,规律性会更明显、更稳定。

2. 分析演变过程线的五种规律性,适当统计某种规律发生的频率。

3. 综合分析给出预报成果。以图 1-1 为例,预报 1979 年平均入库流量。历史演变的规律已叙述过。在预报 1979 年平均入库流量时考虑如下规律性:1978 年的平均入库流量 $\bar{Q}_{78} < 30\text{m}^3/\text{s}$, 则 1979 年必上升;1978 ~ 1979 年可能与 1958 ~ 1959 年、1965 ~ 1966 年相似;考虑到上升幅度的最大可能范围为 $20 \sim 35\text{m}^3/\text{s}$, 故预报 1979 年可能上升到 $35 \sim 55\text{m}^3/\text{s}$ 之间,取平均值 $45\text{m}^3/\text{s}$ 发布预报。实况为 $42\text{m}^3/\text{s}$ 。

历史演变法的优点是:简单易行,预见期长,资料来源便利,适用于一切水文气象要素,目前应用仍很广泛,尤其是有经验的老水文预报人员一直很喜欢采用。其缺点是:要求资料较长;缺乏成因分析;在分析演变规律或预报时没有严格的标准,故人为性很大,预报经验难以推广和传授;当演变规律不明显时很难预报,尤其是转折点和最大最小可能性难以掌握。

第三节 周期叠加外推法

假定水文要素时序变化过程,是由不同周期波互相叠加而成,设其数学模型为:

$$X(t) = P_1(t) + P_2(t) + \dots + P_n(t) \quad (1-1)$$

式中 $X(t)$ 为水文要素的时间序列; $P_1(t)$ 、 $P_2(t)$... $P_n(t)$ 是不同周期波的序列。

若假定由实测的水文要素时间序列可分析出若干个周期,且这些周期在未来一段时期内仍然保持不变,便可用这些周期外延预报,即称为周期叠加外推法。

不难看出,方法的关键是如何分析周期和论证周期的可靠性。

周期分析的方法很多,如谱分析、谐波分析、方差分析等,其中方差分析应用较多。

一、方差分析水文要素序列的周期

(一) 计算组间与组内离差平方和

设某一水文要素序列 $\{X_i\}$, $t = 1, 2, \dots, n$; 将其排列成如表 1-1 格式。

表中 j 为组别(共计 b 组,相当 b 周期); i 为每组含有项数(共有 a 项); T_j 是每组合计值; T 为 $\sum_{j=1}^b T_j$ 为总值; \bar{X}_j 为每组平均值; \bar{X} 是总平均值, $\bar{X} = T / \sum_{j=1}^b a_j$.

组间离差平方和:

$$S_1 = \sum_{j=1}^b a_j (\bar{X}_j - \bar{X})^2 \quad (1-2)$$

表 1-1

$i \backslash j$	1	2	b	
每 1	X_{11}	X_{12}	X_{1b}	
组 2	X_{21}	X_{22}	...	...	...	X_{2b}
项 :	\vdots	\vdots				\vdots	
数 a	X_{a1}	X_{a2}	...	...	...	X_{ab}
组计 T_j	T_1	T_2	T_b	$\frac{T}{\bar{X}}$
均值 \bar{X}_j	\bar{X}_1	\bar{X}_2	...	...	...	\bar{X}_b
T_j^2	T_1^2	T_2^2	...	...	...	T_b^2
T_j^2/a_j	T_1^2/a_1	T_2^2/a_2	...	...	...	T_b^2/a_b

组内离差平方和：

$$S_2 = \sum_{j=1}^b \sum_{i=1}^{a_j} (X_{ij} - \bar{X}_j)^2 \quad (1-3)$$

式(1-2)表示各组组均值 \bar{X}_j 对总平均值 \bar{X} 离差平方和，前面乘 a_j 表示组内所有的项数，本式描述了组间的差异情况；式(1-3)指组内各数据 X_{ij} 对组平均值 \bar{X}_j 的离差平方再求和，描述各组内数据差异情况，由于有 b 组，所以再相加。

目前，实际的计算都已计算机化，若列表计算可以改写(1-2)和(1-3)式为：

$$S_1 = \sum_{j=1}^b T_j^2/a_j - \frac{T^2}{n} \quad (1-4)$$

$$S_2 = \sum_{j=1}^b \sum_{i=1}^{a_j} X_{ij}^2 - \sum_{j=1}^b \frac{T_j^2}{a_j} \quad (1-5)$$

上式的推导可参阅文献 16 附录第二部分。

(二) 方差比的计算及 F 检验确定周期

因事先不知道水文要素变化过程所具有的周期数目，所

以需要反复试验排列各种周期,计算不同周期的 S_1 、 S_2 值,然后分析决定周期数目。但是,不同试验周期的分组数目与每组合有项目数都不相同,因此为了能够互相比较,尚需计算平均组间离差平方和(称组间方差)与平均组内离差平方和(组内方差),即

$$\bar{S}_1 = S_1/f_1; \bar{S}_2 = S_2/f_2 \quad (1-6)$$

式中 \bar{S}_1 组间方差; \bar{S}_2 组内方差; f_1 组间离差平方和的自由度,若试验周期为 b ,即分 b 组则 $f_1 = b - 1$; f_2 为组内离差平方和的自由度,每组的自由度为 $a - 1$,共有 b 组,故 $f_2 = b(a - 1) = ab - b = n - b$;显然,总的离差平方和的自由度 $f = f_1 + f_2 = n - 1$ 。

有了 \bar{S}_1 与 \bar{S}_2 后,便可对试验周期的组间、组内数据离散的情况进行比较,但是,通常组间的方差显著的大于组内方差到什么程度才存在周期呢?这需要计算方差比 F 值。

$$F = \bar{S}_1/\bar{S}_2 \quad (1-7)$$

F 是随机变量,服从 F 分布。

在实用中,先据(1-7)式计算出 F 值,然后由 f_1 、 f_2 与选定的信度水平 α (0.05 或 0.10),在 F 表中查出临界值 F_α ,若:

$F > F_\alpha$ 说明在 α 信度水平上组间方差显著的大于组内方差,有 b 周期存在;否则无 b 周期存在。

试验周期为 $2, 3, \dots, n/2$ (或 $n - 1/2$, n 为奇数时)。一般选择各试验周期计算方差比值中的最大值与 F_α 比较,决定所存在的周期。

二、应用方差分析周期叠加外推预报算例

大伙房水库选用 1940 年至 1975 年年平均入库流量实测

资料编制长期预报方案。该水库用方差分析找到 13 年和 7 年周期,在原序列中滤掉这两个周期波之后得到一个余波,对余波按平稳时间序列处理(将在第四节介绍),其预报方案的数学模型为

$$X(t) = P_1(t) + P_2(t) + \eta(t) \quad (1-8)$$

式中 $X(t)$ —— 年平均入库流量序列;

$P_1(t)、P_2(t)$ —— 周期波动序列;

$\eta(t)$ —— 平稳时间序列。

为检查分析的周期稳定可靠性及预报误差大小,预留 1976 ~ 1986 年资料不参加周期分析。

预报方案编制的步骤如下:

1. 简化处理及计算 $S_1、S_2$ 。

将原序列减去一个“大数”,如平均值,则简化后序列是距平值序列,此时 S_1 的计算式(1-4) 可因 T^2/n 项趋于零而简化为:

$$S_1 = \sum_{j=1}^b \frac{T_j^2}{a_j}$$

进一步简化,又将距平序列值除 10,表 1-2 中 ⑤ 栏总和即式(1-5) 中的值

$$\sum_{j=1}^b \sum_{i=1}^{a_j} X_{ij}^2 = 144.4$$

2. 按各种试验周期 $b, b = 2, 3, \dots, \frac{n}{2}, n = 36$, 用式(1-4)、(1-5)、(1-6)、(1-7) 计算不同的方差比值 F_b 。以 $b = 13$ 为例,详见表 1-3。

表 1-2 方差分析综合计算表

① 年份	② Q_n m ³ /s	③ 土 ΔQ m ³ /s	④ $\pm \Delta Q/10$ $x(t)$	⑤	⑥ $b=13$ 新序列 $P_1(t)$	⑦ 新序列 $z_1(t)$	⑧ $z_1^2(t)$	⑨ $b=7$ 新序列 $P_2(t)$	⑩ 新序列 $z_2(t)$	⑪ ⑧+⑩ $\eta(t)$	⑬ 距平 $z(t)$	⑭ 预报 $Q_{\text{预}}$ m ³ /s	⑮ 绝对 误差 $|e|$	⑯ 评定		
														≤20%升降 合格趋势号		
1940	46	-5	-0.5	0.25	0.57	-1.07	1.14	0.23	-1.30	0.80						
1941	54	3	0.3	0.09	1.80	-1.50	2.25	-0.43	-1.07	1.37						
1942	56	5	0.5	0.25	-0.03	0.53	0.28	0.02	0.51	-0.01						
1943	19	-32	-3.2	10.2	-1.27	-1.93	3.72	1.12	-3.05	0.15						
1944	23	-28	-2.8	7.84	-1.43	-1.37	1.88	-1.25	-0.12	-2.68						
1945	52	1	0.1	0.01	0.10	0	0	-0.12	0.12	-0.02	0.48	0.46	56	4		
1946	40	-11	-1.1	1.21	-0.67	-0.43	0.18	0.37	-0.80	-0.30	-1.04	-1.34	38	2		
1947	75	24	2.4	5.76	3.00	-0.60	0.36	0.23	-0.83	3.23	0.15	3.38	85	10		
1948	26	-25	-2.5	6.25	-2.03	-0.47	0.22	-0.43	-0.04	-2.46	-0.26	-2.72	24	2		
1949	45	-6	-0.6	0.36	-0.20	-0.40	0.16	0.02	-0.42	-0.18	-0.17	-0.35	47	2		
1950	58	7	0.7	0.49	-0.45	1.15	1.32	1.12	0.03	0.67	-0.22	0.45	56	2		
1951	65	14	1.4	1.96	2.55	-1.15	1.32	-1.25	0.10	1.30	0.05	1.35	65	0		
1952	31	-20	-2.0	4.0	-2.20	0.20	0.04	-0.12	0.32	-2.32	-0.19	-2.51	26	5		
1953	72	21	2.1	4.41	0.57	1.53	2.34	0.37	1.16	0.94	0.08	1.02	61	11		
1954	94	43	4.3	18.5	1.80	2.50	6.25	0.23	2.27	2.03	0.13	2.16	73	21	*	

续表

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	
1955	51	0	0	0	-0.03	0.03	0	-0.43	0.46	-0.46	0.29	0.17	49	2	*	
1956	55	4	0.4	0.16	-1.27	1.67	2.79	0.02	1.65	-1.25	0.12	-1.13	40	15	*	
1957	56	5	0.5	0.25	-1.43	1.93	3.72	1.12	0.81	-0.31	0.80	0.49	56	0	*	
1958	19	-32	-3.2	10.2	0.10	-3.30	10.9	-1.25	-2.05	1.15	-0.04	-1.19	39	20	*	
1959	51	0	0	0	-0.57	0.67	0.45	-0.12	0.79	-0.79	0.25	-0.54	46	5	*	
1960	96	45	4.5	20.3	3.00	1.50	2.25	0.37	1.13	3.37	0.50	3.87	90	6		
1961	33	-18	-1.8	3.24	-2.03	0.23	0.05	0.23	0	-1.80	-0.47	-2.27	28	5		
1962	44	-7	-0.7	0.49	-0.20	-0.50	0.25	-0.43	0.07	0.63	0.36	-0.27	48	4		
1963	35	-16	-1.6	2.56	-0.45	-1.15	1.32	0.02	-1.17	0.43	0.07	-0.36	47	12	*	
1964	88	37	3.7	13.7	2.55	1.15	1.32	1.12	0.03	3.67	-0.20	3.47	86	2		
1965	27	-24	-2.4	5.76	-2.20	-0.20	0.04	1.25	1.05	-3.45	0.23	-3.22	19	8	*	
1966	52	1	0.1	0.01	0.57	-0.47	0.22	-0.12	0.35	0.45	-0.19	0.26	54	2		
1967	59	8	0.8	0.64	1.80	-1.0	1.00	0.37	-1.37	2.17	-0.07	2.1	72	13	*	
1968	45	-6	-0.6	0.36	-0.03	-0.57	0.32	0.23	-0.80	0.20	0.04	0.24	53	8	*	
1969	41	-10	-1.0	1.0	-1.27	0.27	0.07	-0.43	0.70	-1.70	-0.15	-1.85	32	9	*	
1970	31	-20	-2.0	4.0	-1.43	-0.57	0.32	0.02	-0.59	1.41	-0.08	-1.49	36	5	*	
1971	85	34	3.4	11.6	0.10	3.30	10.9	1.12	2.18	1.22	-0.32	0.90	60	25	*	
1972	42	-9	-0.9	0.81	-0.67	-0.23	0.05	-1.25	1.02	-1.92	0.56	-1.36	37	5		
1973	71	20	2.0	4.0	3.00	-1.00	1.00	-0.12	0.88	2.88	-0.42	2.46	76	5		
1974	33	-18	-1.8	3.24	-2.03	0.23	0.05	0.37	-0.14	-1.70	0.52	-1.18	39	6		
1975	58	7	0.7	0.49	-0.20	0.90	0.81	0.23	0.67	0.03	0.14	0.17	53	5		
∑	1828		-0.8	144.4		-0.12	59.3		-0.05						23/31	27/31
\bar{Q}	51														75%	93.5%

注：* 表示不合格。