

数学地质基本方法及应用

刘承祚 孙惠文 编著

地质出版社

数学地质基本方法及应用

刘承祚 孙惠文 编著

地质出版社

内 容 提 要

本书主要讲解数学地质的基本知识和应用实例，共十三章，可分为四部分：第一章介绍数学地质的发展和现状；第二、三章为数学地质人员必学的数学知识；第四至九章为各种常用方法的原理和应用实例，其中还讲到用手算或台式电子计算机的应用例题，这特别适合于远离计算中心的单位处理一般资料时参考。第十至十三章为数学地质最新领域的概况。

本书供广大地质人员及地质院校师生参考。

数学地质基本方法及应用

刘承祚 孙惠文 编著

*

地质部书刊编辑室编辑

地质出版社出版

(北京西四)

地质印刷厂印刷

(北京安德路47号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本：850×1168¹/₃₂·印张：15⁵/₈·字数：410,000

1981年6月北京第一版·1981年6月北京第一次印刷

印数1—5,080册·定价3.20元

统一书号：15038·新615

前 言

数学地质是由地质学和数学互相结合而产生的新学科。作为一门学科的数学地质只有约二十年的历史。随着对地质学定量化研究的重视程度日益增高，数学地质也愈来愈多地引起地质学界的重视，数学地质方法的应用几乎在所有的地质学分支领域中都有反映。我国数学地质工作由六十年代初期开始，已作了不少工作，有不少论文和部分专著出版，但我们发现目前已出版的数学地质专著中有以下不足之处：

1. 缺乏对数学地质必要基础知识的介绍和论述；
2. 对应当在地质工作中广泛使用的数学地质方法没有讲深讲透，读者不能从这些书中获得对方法的较深刻理解，这有碍于方法的推广和普及；
3. 对数学地质的最新进展介绍得不够。

鉴于此，编者决定写此书，以弥补上述之不足，这就是本书诞生的背景。

本书内容大体上分为四大部分：

1. 概况（第一、九章），主要包括数学地质概况介绍和多变量分析综述；
2. 数学地质基础知识：第二、三章；
3. 需要向一般地质工作者普及的几种数学地质方法：第四、五、六、七、八、九章；
4. 数学地质最新进展：第十、十一、十二、十三章。

本书由刘承祚、孙惠文合著，刘承祚编著了第一、七、八、九、十一、十二、十三章，孙惠文编著了第二、三、四、五、六、十章。在编著过程中得到有关单位大力支持和帮助，特此表示感

谢。由于编著者水平有限，书中错误及不足之处，希望读者批评指正。

作者

1979年10月

目 录

第一章 绪论	1
§ 1. 数学地质的定义和主要研究内容	2
§ 2. 数学地质发展简史	4
§ 3. 数学地质工作的现状	7
§ 4. 数学地质工作的任务	10
第二章 矩阵代数基本知识	14
§ 1. 矩阵及其初等运算	14
§ 1.1 矩阵	14
§ 1.2 矩阵的加法、减法与数乘矩阵	16
§ 2. 矩阵乘法	18
§ 3. 逆矩阵和联立方程组	23
§ 4. 行列式	28
§ 5. 矩阵的特征值与特征向量	34
第三章 数理统计基本知识及其在地质学中的应用	46
§ 1. 概率的基本概念	46
§ 2. 统计的基本概念	53
§ 3. 数据的整理	68
§ 3.1 分组、列表、制图	68
§ 3.2 主要特征数的计算	72
§ 4. 统计推断	78
§ 4.1 正态总体的检验	78
§ 4.2 正态分布型式的推断	86
§ 4.3 t 检验	89
§ 4.4 F 检验	93
§ 4.5 χ^2 检验	106

§ 5. 方差分析	113
第四章 回归分析	120
§ 1. 问题的提出	120
§ 2. 计算公式概述	121
§ 2.1 一元线性回归	121
§ 2.2 多元线性回归	126
§ 2.3 曲线回归	128
§ 2.4 逐步回归分析简单介绍	128
§ 3. 手算实例	129
§ 3.1 一元线性回归的手算实例	129
§ 3.2 一元曲线回归的手算实例	132
§ 4. 逐步回归的电算实例	135
§ 5. 回归分析地质实例概述	136
§ 5.1 实例之一 回归分析在新生界瓣鳃类化石中的 应用	136
§ 5.2 实例之二 降水量与地下水位升高变幅之间的 相关关系	138
§ 5.3 实例之三 回归分析研究现代河流盆地的地貌问 题	140
§ 5.4 实例之四 河北省某铁矿钠质交代岩石的回归分 析	143
§ 5.5 实例之五 回归分析在各种粘土的工程地质性质 研究中的应用	145
§ 5.6 实例之六 回归分析在研究水库岸边再造中的应 用	148
§ 5.7 实例之七 回归分析在滑坡预测中的应用	150
§ 5.8 实例之八 利用相关分析对我国中部南北地震带 进行地震分区	151
第五章 趋势面分析	156
§ 1. 问题的提出	156
§ 2. 趋势面公式概述	159
§ 2.1 两个地理坐标为自变量的趋势面公式	159

§ 2.2 两个地理坐标和一个垂直坐标为自变量的趋势面 公式	161
§ 2.3 二维付立叶趋势面	162
§ 2.4 趋势面系数的假设检验	166
§ 3. 手算实例剖析	169
§ 4. 电算实例剖析	172
§ 5. 趋势面分析地质实例概述	175
§ 5.1 实例之一 平缓褶皱构造的趋势面分析	175
§ 5.2 实例之二 地下水水位数据趋势面分析	179
§ 5.3 实例之三 用趋势面分析处理化探资料	180
§ 5.4 实例之四 利用图解趋势面法选择钻孔位置	186
§ 5.5 实例之五 趋势面分析在研究岩体特征及指导找 矿方面的应用	192
第六章 时间系列分析	196
§ 1. 问题的提出	196
§ 2. 计算公式概述	197
§ 2.1 时间趋势	197
§ 2.2 自相关	202
§ 2.3 互相关	207
§ 2.4 互关联	210
§ 3. 手算和电算实例	214
§ 3.1 斯宾塞 21 项方程的运用	214
§ 3.2 季候泥剖面的自相关计算	216
§ 3.3 季候泥剖面的互相关计算	222
§ 4. 时间系列地质实例概述	225
§ 4.1 实例之一 时间趋势在分层中的应用	225
§ 4.2 实例之二 利用时间趋势在薄层地质剖面中划分 标志层	225
§ 4.3 实例之三 时间趋势在地层对比中的应用	226
§ 4.4 实例之四 时间趋势在钻孔资料中的应用	228
§ 4.5 实例之五 用趋势分析和互相关追踪剖面	228
§ 4.6 实例之六 利用时间趋势解释沉积环境	231

第七章 判别分析	238
§ 1. 判别分析在地质工作中的作用	238
§ 2. 判别分析的方法原理	239
§ 2.1 两种判别准则	240
§ 2.2 两组判别分析的方法原理	242
§ 2.3 多组判别分析的方法原理	246
§ 2.4 逐步判别分析的方法原理	248
§ 3. 两组判别分析手算实例的剖析	249
§ 4. 两组判别分析电算实例的剖析	254
§ 5. 判别分析应用实例综述	258
§ 5.1 实例一 我国河北省一个铁矿钠质交代岩石的判 别分析	258
§ 5.2 实例二 铁帽的判别分析	260
§ 5.3 实例三 前震旦系地层的划分	265
§ 5.4 实例四 加拿大阿尔伯达省蒙恩特恩公园砂岩的 方解石胶结相和硅酸盐胶结相的判别分析	267
§ 5.5 实例五 玄武岩的判别分析	269
§ 5.6 实例六 判别分析在挪威中部矿产预测中的应用	271
§ 5.7 实例七 美国福里斯科矿区岩脉的判别分析	278
§ 5.8 实例八 美国得克萨斯州中部变质岩原岩的恢复	280
§ 6. 判别分析在实际应用中一些问题的讨论	280
第八章 聚类分析	283
§ 1. 聚类分析在地质工作中的作用	284
§ 2. 聚类分析的方法原理	285
§ 2.1 表示样品相似程度的统计量及其计算方法	285
§ 2.2 聚类结构的形成	286
§ 3. 聚类分析手算方法剖析	288
§ 3.1 R型聚类分析 (一次形成聚类计算法)	288
§ 3.2 Q型聚类分析 (逐步形成聚类计算法)	292
§ 4. 聚类分析电算实例的剖析	296
§ 5. 聚类分析应用实例综述	298

§ 5.1 实例一 河北省一个铁矿钠质交代岩石的聚类分析	298
§ 5.2 实例二 风化淋滤型铁矿床和矿点的聚类分析	299
§ 5.3 实例三 聚类分析在铁矿床类型划分和选择找矿指示元素中的应用	300
§ 5.4 实例四 聚类分析在超基性岩体含矿性预测中的应用	302
§ 5.5 实例五 聚类分析在钨矿勘探中的应用	305
§ 5.6 实例六 聚类分析在工程地质分区中的应用	309
§ 5.7 实例七 聚类分析在火成岩杂岩体岩石学研究中的应用	311
§ 5.8 实例八 聚类分析在英格兰达比郡南部化探工作中的应用	316
§ 6. 聚类分析在实际应用中一些问题的讨论	319
第九章 其他多元统计分析方法概述	320
§ 1. 多元统计分析在地质工作中的作用	320
§ 2. 主成分分析	321
§ 2.1 主成分分析的方法原理	321
§ 2.2 主成分分析的非地质实例	325
§ 2.3 主成分分析的地质实例	326
§ 3. 因子分析	331
§ 3.1 因子分析的方法原理	331
§ 3.2 因子分析实例	333
§ 3.3 因子分析在地质学中应用的一般概况	338
§ 4. 对应分析	339
§ 4.1 对应分析方法原理	340
§ 4.2 对应分析实例	345
§ 5. 非线性映象分析	347
§ 5.1 非线性映象分析的方法原理	347
§ 5.2 非线性映象分析地质实例	348
§ 6. 对多元统计方法在地质工作中应用的评价和展望	355

第十章 地质过程的数学模拟	358
§ 1. 重力作用下褶皱构造的数学模拟	360
§ 1.1 理论分析	363
§ 1.2 计算实例	372
§ 2. 沉积构造的数学模拟	382
§ 2.1 沉积盆地模式	382
§ 2.2 蒸发岩盆地的沉积模式	384
§ 2.3 三角洲模式	388
§ 3. 热液成矿作用的数学模拟	394
第十一章 地质统计学	396
§ 1. 地质统计学的产生和发展	396
§ 2. 滑动平均法	398
§ 3. 克里格法	400
§ 4. 地质统计学方法在矿产储量计算中的应用	405
§ 5. 地质统计学方法在其他矿产地质工作中的 应用	410
§ 6. 地质统计学理论研究的最新进展	415
第十二章 地质数据系统	418
§ 1. 地质数据系统的一般概况	418
§ 2. 地质数据系统的基本原理	419
§ 3. 野外地质数据系统	423
§ 3.1 瑞典的GEOMAP野外地质数据系统	424
§ 3.2 其他野外地质数据系统	429
§ 4. 综合地质数据系统	431
§ 4.1 G—EXEC综合地质数据系统	431
§ 4.2 法国巴黎国立矿业学院的 SIGMI地质数据系统	436
§ 4.3 其他综合地质数据系统	438
第十三章 遥感遥测信息的电子计算机处理	443
§ 1. 遥感遥测的基本概念	443
§ 2. 遥感遥测技术的基本设备	444
§ 3. 遥感遥测技术在地质学中的应用概况	445

§ 4. 遥感遥测信息的电子计算机处理.....	446
§ 4.1 遥感遥测信息电子计算机处理的基本过程	446
§ 4.2 影象处理系统和计算机程序	448
§ 4.3 处理前的影象准备	451
§ 4.4 影象信息的几何校正	451
§ 4.5 影象信息的辐射校正	465
§ 4.6 影象信息的修整	468
§ 4.7 影象信息的分析	469
§ 4.8 影象信息的显示	479
参考文献	484

第一章 绪 论

地质学是一门有悠久历史的自然科学的基础学科。西欧地质科学的萌芽开始于十九世纪三十年代初，英国地质学家莱伊尔（Charles Lyell）发表了“地质学原理”一书，打破了水成论、火成论等观点，奠定了现代地质学的基础。我国最早的地质学著作是“禹贡”，据说是大禹治水时，将各地的山川、地形、物产铸在鼎上。自此以后历代都有不少地质记载。封建社会的长期延续，阻碍了我国现代地质科学的进展，直至1911年才在当时的实业部内建立了地质科，1928年在当时的中央研究院中组织了地质研究所，李四光任第一任所长，从此开始了我国的现代地质学研究。地质学过去基本上是一门定性的科学，长久以来地质工作者主要靠记录和描述的方法收集实际地质资料，通过分析和归纳，得出地质学的主要规律和理论。除了矿产储量计算和地下水运动计算等几个很少的方面外，在地质学中很少采用定量方法，并且很少应用数学。马克思曾指出：只有科学应用了数学才达到完善程度（见拉法格著：“回忆马克思恩格斯”第7页，人民出版社，1973年）。按照这一观点，地质学在未充分与数学结合以前，仍不能算是一门完善的科学。

地质学在自己的发展过程中，由于测试仪器的改进，新的物探、化探手段的增加，特别是人造地球资源卫星象片在地质学中的应用，使地质数据和资料的数量增长速度很快，应用传统的定性手段分析这些资料已无法完成任务。地质学本身的发展，要求引进定量的研究方法，要求应用数学方法和电子计算机。在地质学中应用数学大约开始于150年前，但只是在地质学中推广应用电子计算机以后，才开始比较普遍地和大量地应用数学，这仅仅是最近二十年的事，并逐渐形成了一个新学科——数学地质。

§ 1. 数学地质的定义和主要研究内容

数学地质是在地质学和数学互相渗透、紧密结合的基础上产生的一门边缘学科。它是应用数学方法研究地质学基础理论和解决地质学中实际问题的地质学分支。电子计算技术是数学地质研究的主要技术手段。

数学和地质的结合是指应用数学各个分支领域的重大研究成果解决地质学的理论问题和实践问题。数学是一门内容十分丰富的自然科学，是一门研究数与形的科学，数学中研究数量关系或数的部分属于代数学的范畴。例如：数论、代数数论、群论、环论等。研究空间形式或形的部分，属于几何学的范畴。例如：拓扑学、微分几何学、点集拓扑学等。在形与数两大方面研究互相结合的基础上又形成了函数论、微分方程、数学分析等数学分支。在数学中也有一些边缘学科，如研究客观世界中大量存在的随机现象而形成了概率论、随机过程论、数理统计等随机类学科。由于现代生产与国防建设的需要，形成了优选学、规划论、对策论、排队论等运筹类学科，以及控制论、计算数学等边缘学科。

目前在地质学中只应用了数学的很小一部分。应用较多的是随机类学科（概率论、数理统计、随机过程论，近年来，特别是多元统计应用较多）。函数论、微分方程、数学分析等在地质过程的数学模拟和地下水渗流运动计算中应用较多，拓扑学在地质学中的应用也不少。总之数学在地质学中尚有非常广阔的应用领域。

在现阶段数学地质的主要内容包括：

1. 地质多元统计 应用多元统计方法研究地质问题，是数学地质迄今为止的一个主要方面。已经应用的多元统计方法有回归分析、趋势面分析、判别分析、聚类分析、主成分分析、因子分析、对应分析、典型相关和典型回归、非线性映象分析等。目前

仍不断地向地质学中引进新的多元统计方法。由于地质问题所具有的多元特性，多元统计方法几乎已应用于地质学的所有方面，而且都取得了一定的应用效果。

2. 地质过程的数学模拟 应用数学方法模拟地质过程已是研究基础地质理论的重要途径之一，是数学地质的另一个重要内容。通过数学模拟在电子计算机上使地质过程再现，充分利用电子计算机内存大、速度快的特点，提高地质过程模拟研究的效率，缩短地质过程模拟研究的周期，会大大提高地质理论研究的进程，甚至所得成果，有可能从根本上改变某些旧的地质结论。地质过程的数学模拟研究可分为两大类：第一类为确定性数学模拟，即应用精确的可以得到确定解的数学方法模拟地质过程；第二类为随机过程模拟，应用随机过程方法模拟地质过程。

3. 地质数据的储存、索取、自动处理和显示 应用电子计算机储存、索取、自动处理和显示地质数据是一个很重要的研究方面。可以使地质资料高度集中，避免资料管理重复，高速、可靠地按工作需要提供资料，使地质工作从数据到成图过程自动化，并相应地要求改变某些传统地质工作方法，要求地质记录标准化、地质工作定量化、样品分布合理化、测试技术精密化等。

4. 地质统计学 地质统计学是由南非矿山工程师克里格 (D. G. Krige) 首先创立的，由法国马赛隆 (G. Matheron) 加以完善和发展的一门数学地质独立分支学科，主要涉及到矿产储量计算、品位计算及计算误差问题。近年来，在马赛隆及其领导的小组积极工作下，地质统计学工作有显著的进展。

随着数学向地质学进一步渗透，数学地质这门新学科所包括的内容将会越来越广泛。近来将微分拓扑学的研究成果应用于地质学而建立了地质学中的突变理论模型就是其例。突变理论是数学中的一个最新进展，是法国著名数学家勒内·汤姆于1968年提出的一种新观点。这种理论试图用数学工具描写那种灾难性的或突如其来的变化现象。这种数学上的最新进展很快应用于研究地质学基本理论问题，并取得了成效。如应用突变理论研究断层运

动，把断层运动看作一个突变过程。又如应用突变理论研究二叠纪海洋无脊椎动物的灭绝。大洋中盐分减少是造成二叠纪海洋无脊椎动物灭绝的重要因素。大洋中盐分的突然减少，造成大洋中古代生物的灾难性灭绝。

地质学的数学化问题也是数学地质的基本内容之一，研究如何用数学的语言和公式表达地质学的定义、概念和基本规律，从而将地质学建立在数学化的基础上。

§ 2. 数学地质发展简史

由地质学和数学开始结合到数学地质产生的漫长过程可以划分为以下五个阶段：

第一阶段 由1840年到1935年。这一时期的主要特点是在地质学中应用数学的初步尝试和在个别方面中少量分散的研究。1840年莱伊尔通过古生物化石的统计分析对第三系地层进行了划分。1890年卡尔·皮尔逊 (Karl Pearson) 编写了“数学进化论贡献”一套丛书，内有古生物化石的统计分析。俄国人列文生-列星格 (Левинсон-Лессинг) 在1914年至1934年期间通过研究岩石的岩浆系数的频率分布，研究了安山岩、玄武岩、英安岩、流纹岩的分类。1929年，阿·勃林克曼 (R. Brinkmann) 作了一些生物地层学方面的统计研究工作。

第二阶段 由1936年到1945年。这一阶段的特点是数学方法的应用由地质学的个别问题，逐渐扩展至地质学的一些分支。1939年西姆波森 (G. G. Simpson) 等编著了“定量动物学”一书，为后来古生物统计学的发展奠定了基础。美国人克鲁拜因 (W. C. Krumbein) 由1934年开始进行沉积作用和地层的统计分析，成为美国数学地质的奠基人和一个学派的领导者。1944年，苏联维斯捷列乌斯 (А. Б. Вистеллиус) 在苏联科学院报告集上发表了“分析地质学”一文，提出用定量方法研究地质问题的初步思想。从此，他本人从事了三十多年的数学地质工作，成为苏

联数学地质的创始人和国际数学地质协会的第一任主席。在这一阶段中，电子计算机刚刚研制成功，进行少量试制。1941年第一台电子计算机 Z3 在德国诞生，这时电子计算机在地质学中的应用还没有提到日程上来。

第三阶段 由1945年到1960年。这一阶段的主要特点是数学方法普遍应用于地质学所有分支，和单变量、双变量统计方法的普遍应用。在这一阶段中，电子计算机开始引用到地质学中来。1940年，苏联有人研究金属矿床元素统计分布特点。1954年，绍(D. M. Shaw)等应用统计方法研究地球化学问题。1956年切叶思(F. Chayes)应用均值、方差、标准差于岩石学研究。1958年克鲁拜因从事区域地层统计分析方面的工作。在这一期间，电子计算机开始应用于地质学。1946年在美国宾夕法尼亚大学建立了ENIAC电子计算机，1952年建立了数字绘图仪，1953年编成了第一个FORTRAN编译器，1954年首次成批生产IBM650电子计算机。1958年克鲁拜因首次在地质杂志上公布电子计算机地质计算程序。1958年开始生产第二代电子计算机，同时在一些国家中开始应用ALGOL语言。1958年我国第一台电子计算机109-乙正式制成，投入应用。

第四阶段 自1961年至1970年。在这期间数学方法和电子计算机在地质学中开始广泛应用。美国亚利桑那大学由1961年开始召开了一系列“电子计算机在矿产工业中的应用”讨论会。1962年，由于晶体管电子计算机的成批生产和广泛应用而导致数学地质文献数目的激增(图1—1)。1963年，宣布第三代电子计算机试制成功。美国堪萨斯地质调查所由1966年开始连续出版电子计算机程序集。电子计算机在地质学中应用的文章在1963年第一次超过每年100篇。1964年，在达特蒙斯大学第一次成功地应用了电子计算机分时系统，堪萨斯地质调查所召开了第一次“电子计算机在地球科学中应用讨论会”(以后连续开了八次)，“美国石油地质工作者公报”杂志设立了“电子计算机应用”的专门编委。1967年，在美国石油地质工作者协会中建立了电子计算机数据存