

# 地质数学

[加拿大] F. P. 阿格特伯格 著

科学出版社

# 地 质 数 学

〔加拿大〕 F. P. 阿格特伯格 著

张中民 译

赵鹏大 刘绂堂 蔡文彦 校

科 学 出 版 社

1980

## 内 容 简 介

本书是西方国家出版的地质数学方面书籍中比较详尽的一本。书中第二章至第六章扼要地介绍了微积分、线性代数、几何、概率和统计等几门课程的基本内容,作为阅读地质数学方面书籍的预备知识。第一章以及第七章至第十五章根据作者多年工作实践,结合丰富的地质实例,全面地介绍了目前应用的主要的地质数学方法,并对它们的优缺点作了较客观的评述。

本书可供广大地质人员和地质院校师生,特别是从事地质数学方面工作的同志参考。

### *Developments in Geomathematics I*

F. P. Agterberg

### GEOMATHEMATICS

### *Mathematical Background and Geo-Science Applications*

*Head, Geomathematics Section, Geological*

*Survey of Canada, Ottawa, Ontario, Canada*

Elsevier Scientific Publishing Company, 1974

## 地 质 数 学

〔加拿大〕F. P. 阿格特伯格 著

张中民 译

赵鹏大·刘绂堂 蔡文彦 校

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1980年9月第一版 开本: 787×1092 1/16

1980年9月第一次印刷 印张: 26 3/4

印数: 0001—6,380 字数: 619,000

统一书号: 13031·1240

本社书号: 1725·13—14

定 价: 4.80 元

## 译 者 的 话

自五十年代中期以来, 已经在其他一些学科中得到广泛应用的概率统计方法被逐步引进地质学, 引起了越来越多的地质人员的兴趣。随着电子计算机的广泛使用, 这套方法在地质学中的应用也日益普遍, 日趋完善, 并积累了相当丰富的资料。今天, 地质数学作为一种新的手段正在发挥着它一定的作用。

加拿大地质调查所数学地质组负责人阿格特伯格所著《地质数学》一书, 是西方的这类著作中内容比较全面的一本。作者根据他多年从事这方面工作的实践, 结合许多实例, 较详细地论述了目前在地质学中得到应用的绝大多数数学地质方法; 此外, 作者还编写了微积分、线性代数、几何以及概率和统计等几门课程的简要材料(第二章至第六章), 以供数学基础较差的读者入门之用, 这也是本书的一个独到之处。

当然, 本书也存在某些不足之处。如内容稍嫌庞杂, 对某些问题的讨论不够深入, 有的地方叙述不够清楚等。

本书第一章由蔡文彦同志校对; 第二章至第六章由刘绂堂同志校对; 赵鹏大同志校对了第七章至第十五章。此外, 北京大学数学系雷功炎同志审阅了有关数学的全部内容。

在本书翻译过程中, 刘心铸、谭惠静、谢锡林、余金生、李裕伟等同志曾分别仔细地阅读了一些章节, 提出了许多宝贵意见; 谭惠静、刘心铸、董英君等同志还不厌其烦地做了大量的实际工作; 如果没有上述同志的热情帮助, 译者是不可能在规定时间内完成全书的翻译任务的。在此仅向这些同志致谢。

由于译者水平所限, 有些译法虽和各方面的专业人员反复斟酌, 但错误之处仍在所难免, 敬希读者批评指正。

译者

1978年8月

## 序

地质人员,除少数人外,在运用数学和统计学方面一直是迟缓的。数学这门最古老的科学,在以地质数学的形式应用于研究地球时,却成了地质科学中最年轻的一个学科,这真是令人不可思议的事情。

我有幸怀着越来越大的兴趣积极地参与了将数学应用于地质学的工作,最初是在加拿大数据处理国家委员会,其后在国际地质数据委员会。在战后年代,由于地球物理学和地球化学的急剧发展,产生了大量的数据,而对于处理和计算这些数据,数学(包括统计学)被证明是必不可少的。就在这三十年中,电子计算机也得到了迅速的发展,可以编制程序来综合和处理数字和资料。这样,地质数学在为地质人员的解释工作提供可靠的统计学基础方面起主要作用的阶段就出现了。

毫无疑问,目前大多数地质人员仍然不相信数学会在一门主要依靠归纳推理的科学中产生效果。在他们看来,正如有人说过的那样,许多人利用统计学方法如同历来的醉汉利用路灯杆一样,与其说是用于照明,莫如说是用作支撑。与此相反,我却相信,地质数据若用数学方法整理、核对、综合、计算和检验,则对地质解释、分类、概念检验、问题解答以及概率预报,能提供较之只限于任何个人的经验和记忆更为全面和客观的基础。而且,这样的基础可以作为许多地质人员的共同基础,他们每个人再加上自己的经验和知识去完成他们自己的解释工作。在推进地质学这门科学向前发展的过程中,这种共同基础正好可以成为一个主要因素。

必须找出一些办法来鼓励地质人员,尤其是那些在大学中负责培养新一代的地质学教师,去检验数学用于地质学的效果。为了激起这方面的兴趣,必须在地质人员、地质数学人员和计算机科技人员之间建立起密切的联系。或许,第一步是通过历史情况来说明地质数学在前人的研究中已被证明是多么有用。第二步就需要评论一些极有效的新的数学方法,并说明它们用于地质学的潜力。最后一点,也是带根本性的一点,就是要由地质人员使用其他地质人员能够理解的术语来作这样的介绍。

由于观测和测量在数量和广度上不断增长,地质数学日益成为地球科学中一门必不可少的学科。事实上,地质数学提供了吸收和评价来自地球物理学、地球化学和人造卫星方面迅速增长的数据,并将这些数据简化成可以理解的形式,使之与野外观测相结合的唯一手段。

S. C. 曹宾逊

## 作 者 序

本书是写给对运用数学方法解决问题感兴趣的地质专业的高年级学生、研究人员和教师阅读的。书末的几章中，运用了岩石学、经济地质学、沉积学和构造地质学的较新的概念，而未加详细解释。阅读全书需要具有微积分和统计学的知识。

我推测，本书读者们的数学基础也许差别很大。有些人可能在学生时代学过数学，但以后忘掉了其中大部分概念，因为地质人员通常不用这些概念。本书第一部分包括基本数学方法的复习内容，可以当作简明复习课。基本数学概念用简单的地质实例来讲解。

需要进一步学习数学基础或较深数学科目的读者们可在本书末查阅选读书籍目录。

在书末的几章中，数学解释的程度依讨论的课题有所不同。在大多数章节中，矩阵代数的方法和最小二乘法均以数字算例或地质应用进行了广泛的讨论。其他课题，包括生成函数、随机过程和调和函数等理论，均在将其应用于处理数据之前作简要的介绍。学习认真的学生还应当去查阅数学教科书，以求了解更广泛的论述和论证。这里包括很多课题，其目的是要使地球科学工作者们能利用种类繁多的数学方法。

读者很快就会发现，除各章的引言小节，书中主要包括的是历史情况，往往是很复杂的地质实例。这些实例大部分取自本人在过去十年中随加拿大地质调查所进行的研究工作。着重对每个实例进行介绍并对结果作出地质解释。我希望能满足这样的地质人员的要求：他能够借助计算机运用数学方法处理自己的数据，但他还想更多地了解这些方法的背景，并从中进行实际的选择。

许多章节部分地是以为三门课程而编写的教材为基础的，即：1) 地质学中的统计学，渥太华大学学生一学期的课程(书中第六章，第七章至第十章和第十四章的第一部分)；2) 采矿地质人员需要的矿床评价，皇后大学1969年教学大纲(续)(书中第九章至第十一章和第十五章的一部分)；3) 进展介绍，堪萨斯大学、堪萨斯地质调查所，1970年(书中第九章至第十三章)。这使我有通过数学水平不同的读者检验部分材料。有几章是我在1969—1970年任堪萨斯地质调查所特聘研究员时编写的。

我很感谢 S. C. 鲁宾逊，我和他合写了一篇关于地质学中数学问题的论文，1971年已提交给国际统计学会第38届会议。那篇论文表达的许多观点已概括在本书第一章中。

F. P. 阿格特伯格

# 目 录

第一章 地质学中的数学模型.....	1
一、引言 .....	1
二、地质学中的科学方法 .....	4
三、地质数学的用途 .....	9
四、使用中的数学方法 .....	13
五、经验函数的使用 .....	16
第二章 微积分复习.....	20
一、引言 .....	20
二、古典几何学 .....	20
三、变量和函数 .....	22
四、变换 .....	24
五、平面解析几何的其他概念 .....	27
六、微分 .....	28
七、无穷级数 .....	30
八、误差的传播 .....	32
九、泰勒级数的应用 .....	34
十、积分 .....	35
十一、微分方程 .....	39
十二、复数 .....	44
第三章 矩阵初步.....	47
一、引言 .....	47
二、基本定义 .....	48
三、行列式 .....	50
四、逆矩阵 .....	52
五、线性方程组 .....	53
六、枢轴凝聚法 .....	55
七、齐次方程与奇异性 .....	56
八、分块矩阵 .....	57
九、标准型、特征值和特征向量 .....	58
十、矩阵的幂 .....	61
十一、矩阵的谱分量 .....	62
十二、各种概念 .....	64
第四章 几何学.....	67
一、引言 .....	67
二、向量和矩阵的几何解释 .....	67
三、三维空间中的直线和平面 .....	69
四、二次曲面 .....	74

五、二次曲面的中心和轴 .....	76
六、最小二乘法 .....	78
七、主轴 .....	81
<b>第五章 因子分析</b> .....	<b>84</b>
一、引言 .....	84
二、艾伯特山橄榄岩侵入体实例 .....	86
三、某些热力学方面的考虑 .....	89
四、矿物变量间的统计关系 .....	92
五、因子分析 .....	94
六、因子分析的应用 .....	96
<b>第六章 概率和统计</b> .....	<b>101</b>
一、引言 .....	101
二、集合论 .....	102
三、概率的演算 .....	104
四、二项分布 .....	106
五、离散频率分布和连续频率分布 .....	108
六、正态分布 .....	109
七、显著性检验和置信区间 .....	110
八、矩量法 .....	111
九、期望( $E$ )和方差( $\sigma^2$ )的性质 .....	114
十、从正态分布导出的连续频率分布 .....	117
十一、加拿大地盾构造区的年龄测定 .....	120
十二、估计延续时间的简单数学模型 .....	123
十三、年龄测定的统计推断 .....	126
<b>第七章 频率分布和独立随机变量函数</b> .....	<b>131</b>
一、引言 .....	131
二、随机变量函数 .....	131
三、正态概率纸 .....	135
四、频率分布分析的其他方法 .....	138
五、计算机模拟试验 .....	146
六、概率母函数 .....	150
七、离散随机变量的例子 .....	153
八、复合随机变量 .....	156
九、一个勘探战略问题 .....	157
十、估计量合乎要求的性质 .....	161
十一、最大似然法和其他估计法 .....	162
<b>第八章 统计相关与多重回归</b> .....	<b>168</b>
一、引言 .....	168
二、统计相关 .....	168
三、协方差与相关系数和条件概率 .....	169
四、二元正态分布 .....	171
五、二元回归分析 .....	177



六、多重回归 .....	180
七、最小二乘法的几何解释 .....	184
八、回归分析和分量分析 .....	188
九、序贯回归分析法 .....	190
十、伪变量 .....	191
<b>第九章 趋势分析</b> .....	<b>193</b>
一、引言 .....	193
二、经验趋势函数 .....	193
三、应用趋势分析 .....	195
四、艾伯特山侵入体中的矿物变化 .....	198
五、艾伯特山侵入体中(橄榄岩)的比重 .....	203
六、协方差分析 .....	205
七、纽芬兰威尔斯巴克矿床铜的空间变化 .....	206
八、425 英尺中段趋势面分析 .....	209
九、三维趋势分析 .....	213
十、地表钻孔数据的三维趋势分析 .....	215
<b>第十章 平稳随机变量和克里格法</b> .....	<b>218</b>
一、引言 .....	218
二、空间序列 .....	222
三、德威伊斯模型 .....	228
四、相关图和变差图 .....	229
五、自相关函数的主要性质 .....	231
六、理论自相关函数 .....	233
七、平稳序列的变换 .....	240
八、二维自相关函数 .....	241
九、理论空间自相关函数 .....	242
十、岩石体积平均浓度的方差 .....	244
十一、马西伦的地质统计学理论 .....	246
十二、克里格法 .....	250
十三、具确定性分量和随机分量的最小二乘模型 .....	252
<b>第十一章 调和分析和功率谱</b> .....	<b>257</b>
一、引言 .....	257
二、一维傅里叶级数 .....	257
三、谱分析 .....	259
四、巴洛·奥吉布韦冰川湖中纹泥沉积的随机模型 .....	261
五、薄片矿物的谱分析 .....	267
六、二维调和分析 .....	272
七、东部-中央安大略铜和金矿点的调和分析 .....	277
八、滤波 .....	286
<b>第十二章 矩阵的幂和马尔柯夫链</b> .....	<b>289</b>
一、引言 .....	289
二、西尔维斯特定理 .....	289

三、西尔维斯特定理的应用 .....	291
四、求特征向量的一种迭代法 .....	293
五、迭代过程与幂法的回顾 .....	295
六、求特征值的计算机算法 .....	297
七、马尔柯夫链与转移矩阵的显式 .....	298
八、嵌入马尔柯夫链 .....	303
九、堪萨斯州上宾夕法尼亚旋回层 .....	304
<b>第十三章 多元随机过程模型及其在玄武岩岩石学中的应用 .....</b>	<b>309</b>
一、引言 .....	309
二、岩石学模型 .....	309
三、 $p$ 维情况在哈克图上的投影 .....	313
四、耶洛奈夫火山带 .....	314
五、三角图中趋势线的计算 .....	315
六、九元系统的最佳拟合趋势 .....	319
七、玄武岩浆的其他岩石学模型及主分量与指数的比较 .....	321
八、柯尔莫戈洛夫微分方程 .....	324
九、多元序列的转移矩阵 .....	327
十、第一谱分量的性质 .....	332
十一、柯尔莫戈洛夫微分方程的外推 .....	336
<b>第十四章 从向量数据计算优选方位 .....</b>	<b>338</b>
一、引言 .....	338
二、处理角度数据的方法 .....	338
三、计算平面内向量数据平均值的方法 .....	340
四、平均值的比较 .....	344
五、地段平均值的系统变异 .....	345
六、空间的单位向量 .....	346
七、向量平均值的比较 .....	351
八、单位向量场的地质导引 .....	352
九、拟合单位向量场的方法 .....	356
十、普斯特里亚构造岩 .....	359
<b>第十五章 多元系统的空间变化性 .....</b>	<b>364</b>
一、引言 .....	364
二、与地质结构的复杂性有关的问题 .....	365
三、多元分析法 .....	366
四、判别分析 .....	371
五、概率指数的计算 .....	373
六、多元情况的概述 .....	376
七、艾比蒂比区大型铜矿床 .....	380
八、二阶段最小二乘模型 .....	391
<b>选择读物书目与参考文献 .....</b>	<b>397</b>

# 第一章 地质学中的数学模型

## 一、引言

广义地说,地质数学包括用于地壳研究的所有数学方法。本书第一部分复习微积分,矩阵代数、几何和数理统计。在以后的几章中,将数学概念和方法应用于所选实例的研究。重点放在普遍运用于地质学中的基本原理和实际的数据分析。然而,在所有下述各项工作中,地质人员都需要运用多种地质数学方法。

1. 数据的获得和处理。为各种参数系统记录、整理和比较数据,以及将结果用图表显示的方法。

2. 数据分析。确定需要进行地质解释的趋势、点群以及简单的或多重的相关。

3. 抽样。为实际的数据获得问题提供统计根据。

4. 假设检验。对于被认为可说明具体现象的原因和起源的那些过程的概念或模型(包括模拟模型)加以验证。

5. 应用地质学中的定量预测。对具体问题提供解答,比如计算特定类型矿床在某一地区内出现的概率、火山喷发和地震发生的概率等。

在本章中,我们将讨论应用数学来解决上述范围内的地质问题时存在的困难。这些困难来源于:1)地质现象的性质,例如缺少露头,观测又局限于过去地质事件的记录;2)传统的地质研究方法大多是非数学性的。

将数学应用于解决地质问题时必须十分严格地定义参数,以便能够进行非平凡的推导。第一个困难就是选择真正有意义的变量。在设计用作推理的模型时,记住钱伯林(Chamberlin, 1899)的告诫是很重要的。他说:“数学分析的严密性给人们的深刻印象,以及给人以精确而细致的感觉,不应蒙蔽我们,使我们看不到制约整个过程的前提的缺陷。建立在不可靠前提上苦心完成的细致的数学过程,恐怕比任何别的欺骗手段都更为隐蔽和更为危险。”

### 地质模型

克伦宾和格雷比尔(Krumbin 和 Graybill, 1965)把地质学中的模型划分为三种类型:1)比例尺模型;2)概念模型和3)数学模型。在传统上,地质人员关心的主要是比例尺模型和概念模型。

地质图和横剖面图就是比例尺模型的例子。在这些图中,对于地形表面和垂直面,分别都是以缩尺表示其特征的空间变化的。地质过程也能以比例尺模型表示。哈伯特(Hubbert, 1937)对这个问题作了经典性的讨论。概念模型是现象或过程在头脑里的映象。数学模型包括使用由变量和常数组成的方程。它们是统计模型或确定性模型,这取决于是否在方程或方程组中用了一个或多个随机变量去表达不确定性。数学方程在几何上一般可用曲线或曲面来表示。

上面列举的三种类型的模型并非是相互排斥的。比例尺模型可以数学准则为基础，而概念模型可以是部分定量或全部定量的。

地质学中的大多数数学模型在某些重要方面带有不确定性，因此它们是统计模型。问题可能包含消除数据中的随机变差，以保留代表属性集合体平均数之间的而不是单个特征之间关系的确定表达式。不确定的统计成分提供一种表示各单个特征的不同外推范围的方法，所有这些外推都是可能的，但其出现的概率各自不同。这种方法可取代用绝对必然性去外推现象的方法。

地质学不同于物理学、化学以及其他科学之点在于它进行受控制的实验的可能性更加有限。观测仅限于过去地质事件的记录，这就使地质学成为一门历史科学。一般地讲，很多相互联系的过程的最终产物仅以不完整的方式暴露于地表。这些以物理-化学作用为主的过程很少达到平衡状态；大多数过程还未达到平衡就在一个或更多个特定的时间点上停止了。

### 地质图和剖面图的编制

野外地质工作者关心的是从地表岩石露头收集大量的观测数据，但这种观测往往因露头不好而受到限制。在多数地区，90%或更多的基岩为未固结的覆盖层所遮掩，使观测只限于在有露头的地段（例如沿着河流）进行。这些露头的存在可能是岩石性质的一个函数。例如，在冰川地区可能只会看到伟晶岩或花岗岩的坚硬岩丘，而占优势的软弱岩石可能决不会出露。

必须将可观测到的事实彼此联系起来，例如放在一个地层柱状图里。然后，必须确定它们的趋势，并将其引伸到未知现象中去。这是因为岩石是三维介质，而我们仅能从二维的角度来观测。我们可以看到岩层，但通常不能深入其中。面积性特征必须经过占据空间的体积外推，在该空间中，这些面积性的特征按推定是仍然成立的。

在上一个世纪，地质人员借助概念的方法已经能够想象三维形态。这种技巧并不是轻易得来的。图1[根据尼伊文坎普(Nieuwenkamp, 1968)]表示典型地质外推问题的一个实例。丘陵的顶部由玄武岩组成；古生代的沉积岩出露于山坡，而花岗岩和片麻岩则位于谷中。瑞典这个地区的前两个深部剖面图是由一位杰出的地质学家[冯·布赫(Von Buch, 1842)]作出的。我们可以假定，目前大多数地质人员会很快同意韦斯特加德(Westergard)等人(1943)所作的第三个重建剖面(图1C)。但在冯·布赫的时代，关于玄武岩流在沉积序列中可以形成广泛分布的层板尚未得到公认。

众所周知，地质图经过若干年后就会过时。这并不是由于岩石中可观测的特征发生了变化，而是由于地质概念在不断改变。哈里森(Harrison, 1963)就举了一个在同一地区，但在不同时间所作的地质图的例子。在这种情形下存在的明显矛盾在很大程度上反映了不同时期的总的地质认识水平。

很多地质人员把填图视为创造性的艺术。人们必须把许多零星的证据以缩尺拼合成图。在这张图中，至少包括该地区大部分基岩面。如果不了解该地区起作用的地质过程，通常是不可能做到这一点的。因为这涉及到大量的解释。很多情况只能由专业人员来评价。虽然大多数地质人员都赞同最好把事实和解释严格区别开来，但在实际上很难做到这一点，部分原因是从较大区域所获得的结果在编制图件时必须以1:25,000, 1:250,000

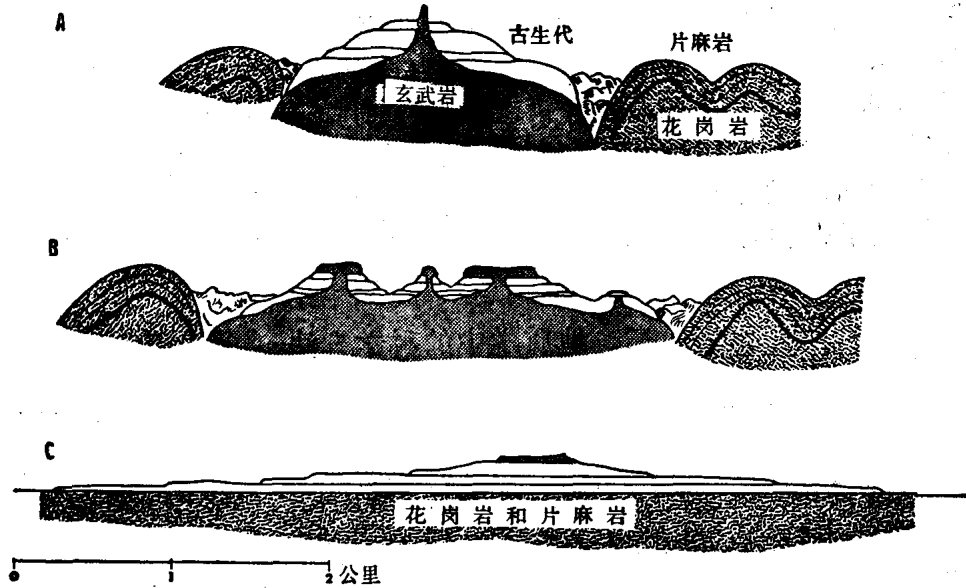


图1 尼伊文坎普(1968)编制的示意剖面图

为了对可在地表观测的地质特征进行三维外推,需要在概念上了解随时间而定的地质过程。横穿瑞典金尼赫尔(Kinneulle)的剖面A和B是根据冯·布赫(1842)的著作中用以说明他的成因解释的图绘制的。丘陵上的玄武岩帽大概有中央火山岩筒与原始玄武岩相联结。冯·布赫设想,玄武岩是以粘滞(非火山型)状态朝上渗透的,而且在局部地区由于原始花岗岩的变质活动,古生代地层变成了片麻岩,这样就修正了水成论的观点。剖面图C是根据韦斯特加德等人(1943)的资料编制的。

或更小比例尺来表示。很多可观测到的特征不能以比例尺模型表示出来,而且由于从一处到另一处的地质环境的很多变化,难于制订统一的规定。

### 不同类型的地球科学数据

一些领域中最近的进展使积累大量数据的可能性增多了,其中很多数据是从在野外采集而后又经过实验室处理的岩石样品中所获得的第二手资料。这就提出了为进一步分析而选择样品的问题。不仅必须消除诸如风化这样的次生过程所造成的偏倚,而且一块样品必须能代表一个较大的整体。根据一块岩石样品获得的结果,如果与另一块从数厘米、数米或数百米之处所取样品的实验室分析结果不同,它就只限于代表它的采集地点。

一般地说,采样应由专业人员进行,但由于他们对一次测定的“影响”范围看法不同,这些采样中可能带有一定的倾向性。地质数学有助于解决这类问题。然而,应该认识到,由于大多数地质环境的复杂性,在尚未根据比例尺模型和专业人员的概念解释对该区地质情况作透彻了解的情况下就去采集样品,是不妥当的。

地质人员、地球物理人员和地球化学人员对同一地区编制不同类型的图。地球物理测定主要是间接的,包括重力和地震数据、地磁场的变化、电导率等等。地球化学人员可对岩石碎样就地进行分析,而且还可对水样或泥样进行元素鉴定。后一种作法给出间接测定值,它是尽可能大的一部分地质环境的加权平均数。

为了表示一个地区的各类地球科学数据,需要的图件可达八种之多。每张图的解释都是不同的,因此需要具有相当丰富的知识,才能读懂所有的图件,以便对该地区获得全面的概念。

除了随着学科的细分而进入地质学的多种多样的名词和概念以外，地质学作为一门定性的科学，也拥有为数众多而内容复杂的术语。遗憾的是，在名词的使用上，差别很大。鲁宾逊(S. C. Robinson)曾经说过，一位地质员所说的“花岗岩”就是另一位地质员所说的“石英二长岩”(参看 Agterberg 和 Robinson)。专业地质人员也许跟得上不断变化的概念和术语。他们在共同的地质考察和讨论中，可以达到彼此的途径一致，至少是相互了解。然而，对于非地质人员来说，地质学作为一门科学却变得日益难于理解了。

## 二、地质学中的科学方法

范·贝梅伦(Van Bemmelen, 1961)指出，地质人员的个人素养在他分析过去的方法中是很重要的。地质人员可分为两种类型：一类是把地质学看作是一种创造性的艺术，而另一类则把它看作是一门精确的科学。按照赖特(Wright, 1958)的说法，某些科研人员目的在于将他们所研究的对象进行分类，希望将某些系统的严格规定硬套在它们上面。另一些人则较易于接受新概念，不那么死板地将研究对象进行系统化。奥斯特瓦尔德(Ostwald, 1910)将地质人员分为“经典派”和“浪漫派”。魏格曼(Wegmann, 1958)指出，在早期的地质学家中，沃纳(Werner)是经典派，而赫顿(Hutton)则是浪漫派。

十八世纪末叶，沃纳提出了泛沉积理论——“水成论”，按照这种理论，所有的岩石，包括花岗岩在内，都沉积在原始海洋中，以后也没有变化。尼伊文坎普(1968)指出，这种理论与谢林(Schelling)和黑格尔(Hegel)的哲学概念有联系。当沃纳的观点遭到提出在地质时期中有变化过程的其他早期地质人员的批判时，黑格尔(参看 Nieuwenkamp, 1968)通过对地球构造和房屋结构的比较回答了他们。人们仅着眼于整个房屋，至于首先打地基，最后盖屋顶这一点则并不重要。起初，沃纳的概念模型提供了恰当和充分的分类系统，尽管他的追随者冯·布赫在试图用该模型解释欧洲不同部分的岩石产状时，很快就碰到一些问题。图1说明了这一点，在这里认为原始花岗岩后来又活动起来，使沉积岩变成片麻岩，而原始玄武岩变成火山岩的来源。

沃纳的同代人和对手赫顿提出了“火成论”以代替水成论。他是一个浪漫派(Wegmann, 1958)，提出地球中物质的连续周期性循环的模型。他的理论不是规定了一个死板的分类系统，而是为探索在地质时期中各种各样相互关联的深成和构造过程的可能事件打开了思路。

地质学经历了极其大量的争议和论战，这与参加者的个人素养和经验密切相关。例如，水成论起源的地区沉积岩位于花岗岩和片麻岩顶部，而赫顿首创的火成论则起源于苏格兰，在那里花岗岩侵入的构造运动较为明显。

格里菲思(Griffiths, 1970)指出，最近一个时期关于“花岗岩”成因的热烈争辩现在更明确地提出来了，这就是究竟“多少花岗岩是以这种方式形成的，而多少又是以那种方式形成的”。他并且认为，只要没有更定量的语言来表达，这个问题就不能得到解决。

### 需用多少数学？

按照范·贝梅伦(1961)的意见，奥斯特瓦尔德所指的经典派科学家可能仅承认物理学和化学是真正的自然科学。任何关系都应是能够测定的，并可以用数学表述。经典派倾

向于把地质人员比作朝着遥远的全部量化的最终目标奋力前进的一群“粗野的石器时代的”科学家。

另一方面，大多数地质人员也不愿毅然朝着被他们认为是“机器化地质学”的方向深入前进。有些人把地质学说成是“一门不精确的科学和艺术”(Link, 1954)；另一些人则认为，地质学起初主要是描述性的，但到二十世纪中叶，它已发展成一门精确的自然科学，“大量地运用了化学、物理学和数学”(Leet和Judson, 1954)。

地质学的定量程度是否应当比目前已达到的水平更高，这是地质人员过去不断考虑的问题。费歇耳(Fisher, 1954)认为，由于莱伊尔(Lyell, 1833)的贡献，地质学已逐步成为一门较为定量的科学。反对这种发展的势力很快达到如此的地步，他们竟然将莱伊尔精心编制的第三纪地层划分表和统计论证(长达60页)从他的《地质学原理》一书以后的版本中删去了。

大多数地质人员都认为钱伯林(1897)提出的“多重工作假说”的科学方法对地质学是较为理想的。由于地质过程十分复杂，需要进行多次探索。遗憾的是，这种方法太复杂，观测工作量太大，因此不切实际。地质人员倒是习惯于从一些大致相联系的观测中进行综合，以发展一种较理想的假说。对各种方案可能都进行了考虑，但最终结果通常反映一种较理想的探索方法。

某些地质人员对牵强附会的推测已感到厌倦，从而把他们的着眼点仅局限于数量有限的绝对确定的事实。回顾一下范围较广的地质问题，如造山运动或成矿作用，就可以看得很清楚，专业人员之间很少取得一致意见，特别是如果还考虑到发表的日期，就更是如此。数量有限的事实是确凿无疑的，但是，由于概念模型的范围广泛，它们之间的矛盾也趋于扩大(参阅后面讨论的图114)。

格里菲思(1962)强调指出了钱伯林的方法和费歇耳(1960)所叙述的统计分析之间的相似性。如果地质事件能以数字形式充分地表达，则使用不同的统计模型和形式推理去检验同一问题的不同假设是可行的。较大规模的地质资料量化首先可由大量地将专业人员所作地质图、剖面图和其他比例尺模型数字化组成。这些结果并不一定是地质研究的最终产物，但是它们可用于以多变量统计模型为基础的计算。

由于意识到其他科学，包括社会科学——经济学、社会学和心理学，都已从增加使用数学方法中获益，因此地质学的量化也得到了推动。五十年代中计算机的出现对定量地质学也起了促进作用。另一方面，这种进展有时也导致了在数据能以更系统的方式搜集、而设计实验时可较为自由地选择控制条件的其他一些科学中乐于接受已确定可应用的数学手段。

目前用于地球科学数据的多数数学方法是建立在定量测定基础上的。实际上，在一个地质实体中能够搜集到的定量数据的数目通常是有限的。很多数据都是“有-无”型的。例如，在某一特定地区有砂岩而无页岩，而在另一地区，则有页岩而无砂岩。

如果在某一特定地区，出现很多不连续或突然变化的状态，则资料可能仅限于说明某一种岩石类型占主导地位。在许多地质图上，唯一系统记录的资料是以年代-地层柱状图为依据的岩系时代。关于岩石其他特征的描述可能就写在注解中了。

由于缺乏精确的数据，地质数学问题的范围不可能象定性地质学中概念模型的范围那么广，在定性地质学中，许多不同类型和不同地点的资料是综合在地质人员的头脑里

的。范·贝梅伦(1972)说过,在地质人员的一生中,他记住了大量的事实和概念,在他头脑中形成了一个背景,当进行地质工作时,他可以从中抽取有关的见解。当遇到新情况时,地质人员可以联想起某些因素表现得更为清楚的一些类似的情况。这种经验中只有一部分可以传授给其他人。如果这样累积起来的互相关联的事实可以储存在机械脑中,以使它适用于一切,这将是很有用的。

### 地球科学数据的计算机存储和检索

某些作者,特别是鲁宾逊(1969)和赫鲍克斯(Hubaux)强烈地意识到并提出需要有以标准形式表示的数据。有些地方研制了面向计算机的文件,它存储许多同类事件,可供有选择地检索(Laffitte, 1969; Dixon, 1970)。

包括 S. C. 鲁宾逊(1970)和博斯蒂克(Bostick, 1970)在内的许多作者都举出了记录地质数据的编码形式的例子。赫鲁斯卡和伯克(Hruška 和 Burk, 1970)编制了讨论地球科学数据的计算机存储和检索系统的 336 份刊物的目录。梅里安(Merriam, 1971)编纂了关于地质科学数据处理的参考文献目录。

为了能用计算机进行系统整理,对加拿大所用的野外数据的标准化进行了三次实际探索,这代表了使野外原始记录具有一致性和客观基础的早期尝试。这三次探索是:在曼尼托巴(Manitoba)进行的“行动先锋”(Haugh 等人),在不列颠哥伦比亚进行的“海岸山脉工作方案”(Hutchison 和 Roddiok, 1972)以及对魁北克制定的“格伦维尔(Grenville)制图程序”(Wynne-Edwards 等人, 1970)。他们在各自的工作站均用同样的标准编码形式。这些地带主要由火成岩和变质岩组成。在魁北克计划中,资料的详细程度足可以用计算机来进行岩石的自动定名。在另两个项目中,采用了一组商定的特殊岩石名称的定义。在哈奇森(Hutchison)和罗迪克(Roddiok)以及温·爱德华兹(Wynne-Edwards)等人进行的这些工作项目中,用了自动绘图仪来绘出工作站,并把在这些工作站测得的属性绘于图上。

在格陵兰(Alexander-Marrack, 1970)和挪威的斯匹兹卑尔根(Spitzbergen)(Piper 等人, 1970)都对沉积地层进行了类似的工作,他们都采用了沉积剖面的标准化记录。挪威的纳维亚国家联合使用一种在地质制图中存储和处理数据的系统——GEOMAP(Berner 等人, 1971)。

整理地球科学资料的新方法应当包括发展国内的和国际的以计算机为基础的数据文件网络(Burk, 1968)。地质数据的索引文件可以有一个精心编制的互相参考的系统(McGee, 1969)。

计算机的工艺发展很快。现在很多地方可以直接使用数字计算机,或者通过一个用电话线路与中央数据处理装置联络的终端设备来使用它们。计算机可以具有一个内存储器,借助于多变量技术的快速算法可在里面同时处理十万个以上的个体事件。此外,计算机还有由磁带和磁盘组成的实际上是无限的外存储器,里面可以存储几百万个或几十亿个事件,可供选择性提取、打印或在内存储器进行处理。

如果能找到存储事件的适当结构时,地质学就能从上述可能性中获益更多。理想的做法是,将某一特定地区的几百万个或几十亿个数据按照它们在三维空间的或关于等体积格子的网格的位置存储起来。这样一个庞大的数据库既可用于作常规的地质图和剖面



图,也可用来进行计算,通过这种计算使事件和变量相互联系起来。这种作法的主要困难是要找到衡量单个事件轻重的方法。例如,测定一个层位在某一特定地点的走向和倾斜是没有意义的,除非对于地质环境已有大量的资料。布里格斯(Briggs, 1969)和劳登(Loudon, 1971)都提出了关于把个体事件作为更复杂的统一体中的一部分来记录的有意识的建议。

### 地质人员对计算机的使用

对于地质人员来说,问题是:要使用计算机,必须在他头脑里再补充若干术语和概念,这次增加的是数学和计算机科学的基础知识。按照惯例,在教给地质专业学生的主要科目中,数学水平是低的(参考 Harbaugh, 1965)。地质人员在使用计算机时,必须大大地依靠较为熟悉这一专业语言的人。这样就会造成曲解。地质人员不应期待计算机中心的专家来解决诸如如何采岩石样品这样的地质问题。他可能帮助的或者是为了存储和检索问题而用 COBOL 或 FORTRAN 语言编制计算机程序,或者为了进行数学计算而用 FORTRAN 或 ALGOL 语言编制程序。

为了解决涉及很多基本运算的特殊问题,可以使用从科学子程序包中获得的有效算法。基本运算是布尔代数的逻辑语句和诸如加、乘、乘方这样的算术计算。虽然所有基本运算都是简单的,但是它们执行得如此之快,以致可以很快解出矩阵代数、积分和调和分析的复杂数值问题,这就为地质数据的多变量统计分析铺平了道路。

值得注意的是,这些数学的数据处理技术的有效性,会诱使相信数学的地质人员去对有限的数据进行广泛的计算,这可能会造成“机器化地质学”的印象,而这是受到其他地质人员怀疑的。

### 归纳和演绎

把观测数据排列成互相联系的型式是“归纳”的思维过程。它包括提出一种和事实相符的假说或理论。如果最初基于直觉作出的工作假说导致了可以得到验证的“演绎”,这种工作假说就起了有效的作用。根据假说进行的逻辑演绎为尚未观测到的事实提出预测。假说的有效性是根据制定该假说时尚未考虑到的新事实进行检验的。新的事实可能导致这种假说或理论的修改。结果是归纳和演绎的轮流循环。范·贝梅伦(1961)把这种方法称为预测-判断研究法。

这种方法通常用于定性地质学的概念模型中。问题在于当利用一种理论去探索基本观测数据时,不同的科学家可能对各基本观测数据的重要性的衡量以不同的强调。这就可能造成概念模型之间的重大差异。

对于彼此可能不同而且数据可被不同地加权的数学模型来说,上述方法也是适用的。上面已经提到,数学模型的应用范围不可能象定性地质学中大比例尺概念模型的应用范围那样广。将来通过设计日益复杂的、考虑到空间位置、环境背景和特征的年代的多变量方法,地质数学方法的应用范围有可能扩大。这些方法应当用到包含几百万或几十亿个体事件的数据库中去。验证这种模型的有效性将会比任何时候更加重要。使用计算机,就比较容易对复杂方法进行多重应用。科学的预测-判断法便提供了一种检验方法。这种方法不仅适用于整个数据集,也适用于若干子集。根据子集所作预报的有效性是在未