



普通高等教育地质矿产类规划教材

矿床统计预测

(第二版)

赵鹏大 胡旺亮 李紫金 编著



地质出版社

普通高等教育地质矿产类规划教材

矿床统计预测

(第二版)

赵鹏大 胡旺亮 李紫金 编著

地质出版社

·北京·

(京)新登字085号

内 容 简 介

本书是编著者在多年科研和教学实践基础上,参阅大量国内、外文献资料,根据教学大纲的要求撰写而成。

全书共分七章,前三章阐述了数学地质发展现状、数理统计中某些基本概念以及地质变量的构置、取值、变换和选择,第四章阐述了矿床统计预测的基本理论和准则,第五至七章为矿床统计预测的方法学,分别为矿产资源潜力估计方法,成矿远景区、找矿靶区的圈定方法,地质标志指示含矿性和地质特征的统计分析方法。本书力求完整系统,理论、方法、应用并重,有利初学者建立数学地质和矿产资源预测思维,掌握基本理论和方法。

本书为地质矿产类规划教材,是“地质矿产勘查”专业、“数学地质”专业本科和硕士学位的教材,也可供地质、地球化学、环境科学等方面科技工作者及有关院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

矿床统计预测/赵鹏大等编著. -2版. —北京:地质出版社, 1994.6

普通高等教育地质矿产类规划教材

ISBN 7-116-01504-3

I. 矿… II. 赵… III. 矿床-统计分析(数学)-预测技术
IV. P612

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第00872号

普通高等教育地质矿产类规划教材

矿 床 统 计 预 测

(第二版)

地质矿产部教材编辑室编辑

赵鹏大 胡旺亮 李紫金 编著

*

责任编辑:石冀弘 陈 磊

地质出版社出版

(100013 北京和平里七区十楼)

北京百善印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本: 787×1092^{1/16} 印张: 20.125 字数: 510千字

1994年5月北京第2版·1994年5月北京第3次印刷

印数: 1—1400册·定价: 9.20元

ISBN 7-116-01504-3

P·1222

再版前言

“矿床统计预测”第一版问世至今整整十年了。作为地质矿产类专业本科生教材和研究生以及各类成人教育短训班的参考教材，它在普及和介绍数学地质学基本知识和理论，在阐明应用数学地质理论和方法进行矿产预测等方面发挥了应有的作用。

矿产资源定量预测与评价的工作方兴未艾。1980年地质矿产部设立了重点科研项目“矿产资源总量预测方法研究”，并在全国范围内对金、铜、铁及石灰岩四种矿产进行非总合式资源总量预测。这项工作的开展，大大推动了数学地质理论和方法在矿产预测工作中的应用。不仅获取了有实际应用价值的预测评价结果，而且丰富了矿床统计预测的理论和方法并培养和训练了一支矿产资源定量预测和评价的队伍。近年来，我国各地地质矿产部门普遍开展中、大比例尺成矿预测工作，这是在找矿难度日益增大的情况下提高找矿效果的有效途径。中、大比例尺成矿预测应该集理论找矿、综合找矿、主体找矿及定量找矿于一体，它不仅应以深入的基础地质及成矿地质研究为前提和依据，而且应该采用各种能有效提取成形和找矿信息的综合技术手段，而这种多源信息的合成以及它们与成矿关联程度的确定，各种地质因素和找矿标志重要性及信息量的评价，研究地区成矿找矿概率及矿产资源量的估计等等都有赖于数学模型和计算机的应用。因此，矿产资源定量预测和评价或矿床统计预测日益受到国内外研究者以及矿产勘查工作者的重视。1992年2月创刊的国际数学地质协会新期刊“不可再生资源”在编者引言中写道：“近年来所发生的政治、经济事件，要求对局部的、一国的以致国际的不可再生资源问题付出更大的努力，以发展定量研究方法。特别是资源定量评价已经获得在国家机构工作的土地管理人员和政策计划人员以及在私人部门工作的勘查管理人员和公司计划人员的公认。现在很有必要让各个国家和公司知道，现在他们拥有多少（资源）？他们还能找到多少？如果获得成功它们的价值有多大？如果不能取得成功将会发生什么问题？要回答这些问题，需要对地质学、经济学、统计学和财政学各学科进行交叉综合研究。在不可再生资源研究的一切领域，定量方法正在取代早先的主观方法。”

从本书第一版至今的近十年中，矿产资源定量预测及评价的主要进展可概括为以下几方面：

1. 统计预测由二维平面向三维立体预测方向发展。深部信息，推断地质变量在预测模型中的作用越来越大、预测深度加大。
2. 依托于数学的新进展发展了许多新的定量预测途径、建立并应用新的矿床预测数学模型。如模糊数学、分形几何、灰色理论、系统分析在成矿预测中的应用。
3. 图形、图像信息的广泛应用，特别是地理信息系统（GIS）的开发为空间数据和图形数据的应用开辟了新的前景。
4. 无论国内外，矿床统计预测有了更广泛的实践，在这个基础上，统计预测的理论、准则和方法进一步完善、研究进一步深化。
5. 取得了一批经过验证的成果，其中既有成功的经验、也有失败的教训，这些对改进和完善统计预测理论和方法都是十分重要和宝贵的。

上述变化和发展，有些在本次再版时得到了反映，但更多的资料由于篇幅所限和时间紧迫而未能涉及，这是我们引以为憾的。我们将努力在今后加以弥补。

作 者

1993年1月

(1983年版) 前言

近年来,国际上的一些未来学家预言世界即将面临的几个根本问题是:人口、粮食、能源、资源及环境。第26届国际地质大会主席在一次会议上也强调:“本世纪末的中心问题就是能源和矿产资源问题”。生产和消费的迅速发展,人们对矿物原料的需求量也日益增长。有人估计,到2000年,我国人口将达到12亿,为了实现人均收入1000美元的目标,每人消耗能源以现代化的最低标准1.6吨计,则总共将消耗能源为19.2亿吨。如果其中煤炭占70%,石油占10%,则两种矿产应分别达到年产12亿吨和1.9亿吨。如按一般正常的采储比(设煤为1:60,石油为1:35)加以折算,则煤和石油应分别有780亿吨及70亿吨储量为保证。显然,发现和探明如上数字的储量乃是一项十分艰巨的任务。此外,对于不可再生的矿产资源长期供给保证问题一向是人们所普遍关注的大问题。

另一方面,由于易于发现的露头矿、浅部矿、大型矿和已知类型矿的日趋减少,找矿勘探的难度日益增大。如加拿大,1950年以前,85%矿床由传统方法找出,1951—1955年期间下降至46%,1956—1960为25%,1961—1965为31%,而1966—1969仅有9%。与此同时,找矿勘探的成本却大为提高。1950年加拿大的矿床勘探费用占金属矿床产值的0.8%,1955年增至2.4%,1960年为3.2%,而1965年则增加到4%。不仅如此,由于当今对矿产预测、普查找矿及勘探等工作投入工作量的增加,因而由这些工作的失误所造成的损失也就明显增大了。

为了满足对矿物原料日益增长的需要,必须提高普查勘探工作的效果。以深入研究地质成矿规律为基础的矿产预测工作日趋重要。近30年来,成矿规律学迅速发展并形成了几个独立分支:①全球成矿规律学、②区域成矿规律学、③矿区成矿规律学及④专门成矿规律学或各别元素成矿规律学。与此同时,人们积极探索新的矿床预测理论和方法,其中数学地质及电子计算机在矿床预测中的应用是近十年来最重要的成果之一。目前,数学地质在矿床预测中的应用或矿床统计预测也相应地形成了几个重要方向,即:①矿产资源总量估计及潜力评价、②成矿远景区定量预测及③成矿、找矿地质标志的统计分析及其含矿性评价。

目前,矿床统计预测是数学地质最活跃的一个分支。与26届世界地质大会同时召开的国际数学地质学术讨论会上有关矿床统计预测的论文占论文总数1/3;我国长沙第二届全国数学地质学术讨论会上有关矿床统计预测的论文占1/4,无论国内外,矿床预测都成为数学地质首屈一指的应用领域。

本教材正是根据上述形势的需要而编写的。作为矿床地质专业和矿产地质及勘探专业的学生,学习数学地质的最基本目的不仅在于掌握数学地质的基本理论和方法,而且还应了解如何将这些理论与方法应用到地质勘探工作的最重要领域——矿床预测中去。

本教材是在1978年编写的《地质勘探中的统计分析》基础上经过三年教学试用加以补充修改而完成的。参加1978年教材编写工作的有赵鹏大、胡旺亮、李紫金、冉宗培及邹海卿等同志。

本教材在编写时除根据作者近年来在矿床统计预测研究中获得成果外,还广泛应用和参阅了国内外有关单位和学者的资料。主要有中国科学院,中国地质科学院数学地质组,长

春及成都地质学院数学地质研究室及教研室，云南大学数学系及联合国教科文组织北京矿产资源评价讨论班专家报告等资料。在此对以上单位和有关学者表示感谢。

武汉地质学院数学教研室刘绶堂同志曾详细阅读1978年教材第一稿并提出宝贵意见，地质部资料局袁君孚高级工程师及刘绶堂同志又对本教材原稿进行了详细审阅并提出宝贵意见，在此对他们表示衷心感谢。

在本教材编写及定稿过程中，武汉地院教材料、绘图室及矿产系等单位给予了大力支持和帮助，特别是褚松和、王润斋、邢相勤、张桂珍、黄宏瑞等同志及77级部分学生作了大量辅助工作，在此一并表示感谢。

对本教材中的缺点和错误，敬希读者批评指正。

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 数学地质的任务、对象和发展	(1)
第二节 数学地质发展的必然性	(4)
第三节 概率统计中的某些基本概念	(8)
第四节 地质学中应用统计分析的特点	(12)
第二章 地质勘探数据的统计分布特征及其意义	(17)
第一节 研究统计分布特征的意义	(17)
第二节 在地质上重要的几种分布模型	(18)
第三节 混合分布及其地质意义	(35)
第四节 分布模型在地质研究中的实际应用	(44)
第三章 地质变量研究	(47)
第一节 地质数据的预处理	(47)
第二节 地质变量的类型	(52)
第三节 地质变量的选择	(53)
第四节 地质变量的取值和综合变量的构置	(61)
第五节 地质变量的变换	(63)
第四章 矿床统计预测的基本理论和准则	(69)
第一节 矿床统计预测的基本理论	(70)
第二节 矿床预测中基本准则	(82)
第五章 矿产资源总量估计及潜力评价	(85)
第一节 矿产资源潜力评价概论	(85)
第二节 资源总量估计和潜力评价方法	(87)
一、“镶嵌模型”估计矿床产出概率法	(87)
二、矿床值概率分布法	(87)
三、单位区域价值估计法	(92)
四、丰度估计法	(96)
五、体积估计法	(99)
六、矿床模型法	(100)
七、德尔菲法或主观概率法	(106)
八、综合法	(108)
第六章 成矿远景区定量预测	(111)
第一节 预测比例尺、基本单元划分及控制区的确定	(113)
第二节 秩相关分析法预测	(118)
第三节 信息量计算法预测	(123)

第四节	多元回归及逐步回归分析法预测	(125)
第五节	判别分析法预测	(144)
第六节	聚类分析法预测	(161)
第七节	逻辑信息法预测	(179)
第八节	特征分析法预测	(198)
第九节	数量化理论预测	(209)
第七章	地质标志的统计分析 & 含矿性评价	(220)
第一节	地质趋势研究	(221)
第二节	最优分割与地层划分	(243)
第三节	阶梯函数分析与变质岩分层及构造模式的建立	(252)
第四节	因子分析与地质成因解释	(260)
第五节	对应分析	(276)
第六节	非线性映射分析	(284)
第七节	典型相关分析	(295)
第八节	马尔科夫过程与地质过程的随机模型	(303)
尾 语		(312)
主要参考书		(314)

第一章 绪 论

第一节 数学地质的任务、对象和发展

作为一门新兴的边缘学科——数学地质近年来在国内外有了很大发展。地质学从传统定性描述和成因推理进入到应用数学作为工具，并且运用现代电子计算技术自动处理地质数据，显示地质成果并解决各类复杂的理论和实际问题，这不能不说是地质学发展中的一次质的飞跃。

关于数学地质的任务、对象和内容至今还没有一致的看法。概括地说，有两类观点。一些学者认为数学地质包括“地球科学中的全部数学应用”（F. P. 阿格特伯格1974），类似观点如“地质数据的定量分析方法”（J. C. 戴维斯1973）；“用数学方法研究和解决地质问题”（中国科学院地质所数学地质组《数学地质引论》1977）等，诸如此类可认为是“广义的观点”。另一些学者，如 A. B. 维斯捷利乌斯（1977）则强调必须严格区分数学地质和地质学中的数学，在谈到这两者的关系时他认为：地质学中需要用数学方法既解决各类带根本性的任务，也解决各种技术性问题，但不是所有的数学应用都属于数学地质范畴。维斯捷利乌斯认为国际上的经验表明，地质学中的数学应用有以下三个不同的方向：①在地质科学领域中建立自己的数学学科——数学地质；②与数学地质无关的信息处理，即资料文件的存储、检索和显示等；③利用数学解决储量计算、矿山经济、最优勘探方法等问题，这是个独立的、对实际十分重要的方向，它既与数学地质，也与地质学有间接关系，它属于矿业学。基于上述认识，维斯捷利乌斯认为“数学地质是建立、检验和解释地质过程的概念的、随机模型的科学”。这可谓“狭义的观点”。由于对数学地质的学科性质、任务和内容有不同理解，所以也存在着不同的命名，如“数学地质”、“地质数学”、“定量地质学”、“地质数据统计分析”等等。

我们认为，数学地质是研究最优数学模型并查明地质运动数量规律性的科学。它以数学为工具，电子计算机为手段，解决地质问题为目的。数学地质解决问题的一般模式是：

地质问题→数学问题→地质解释 或 地质模型→数学模型→地质解释

上述关系说明，数学地质必须以地质为基础和出发点，经过变地质问题为数学问题或变地质模型为数学模型，最后达到解决地质问题或对数学分析结果进行地质解释的目的。由此可见，数学地质的主要对象是地质体、地质过程及地质工作方法，但为了更有效地解决复杂的地质问题，还必须对所应用的数学模型进行研究。

具体地说，数学地质的任务可概括为以下三个主要方面：

1. 查明地质体的数学特征，建立地质体的数学模型；
 2. 研究地质过程中的各种因素及其相互关系，建立地质过程的数学模型；
 3. 研究适合地质任务和地质数据特点的数学分析方法，建立地质工作方法的数学模型。
- 地质科学中最早应用统计分析方法一般追溯到1833年。当时英国学者莱伊尔首次用统计

分析方法对第三纪地层进行划分。尽管地学中应用统计分析已有100多年的历史,但在这当中几经起落和兴衰。

早期阶段,大致在本世纪20—40年代,数学方法主要应用于一些实用地质学的领域(如矿床勘探和评价)、岩石学(如沉积岩粒度分析、岩浆岩分类等)及地层古生物学方面(如化石种属变异特征的研究等)。这个阶段的特点是应用单变量统计方法,利用个别的统计标志解决某些具体的地质问题。另外,这一阶段也是对统计分析在地学中应用的可能性问题进行争论最激烈的时期。

40年代后期,数学方法在地质学中有了广泛的应用。特别值得提出的是多元统计分析开始得到应用。如1949年古生物学家Burma在“多元分析——地质学和古生物学中的一种新型分析工具”一文中指出了多元统计方法是一种最有远景的计量生物学方法。1956年克伦宾在研究岩石的矿物、岩性和化学成分时应用了多元分析方法,把岩石成分作为N维空间中的一个点或向量来进行统计处理。在这一阶段,法国和非洲南部的一些地质和统计学家创立了“地质统计学”的理论和方法,它和传统的统计学不同,地质数值被看成是空间变化具有貌似连续性的变量的值,这种变量称为“区域化变量”。通过研究区域化变量特征建立变差图(或变异函数)。这一方法主要应用于矿床储量、品位估计及矿石评价方面。近年来,美国、加拿大和澳大利亚等国加强了这方面的研究和应用。

从60年代开始,数学地质进入了其发展的极盛时期。仅1968—1970年有关数学地质的论文超过3000篇。1968年成立了国际数学地质协会并从1969年起出版了专门的数学地质期刊。近年来,更出版了不少数学地质方面的教科书和专著,反映了几乎地质科学一切领域中应用数学地质方法的成果和经验。

这一阶段开始的高速电子计算机的应用,不仅扩大了数学地质的应用范围和引入更多的多元统计分析方法,而且出现了地质过程计算机模拟这一富有重大意义和生命力的方向。此外,地质数据的计算机存储、检索、显示等数据管理和资料文献计算机管理方面的进展也为地质科学的现代化作出了重要贡献。

近年来,与数学地质有关的国际学术会议频繁召开。如1971年在海德堡召开第一次“沉

表 1-1

应 用 领 域	论 文 篇 数
矿床勘探、矿产预测和资源分析	31
沉积、地层及古生物研究	26
地质图书情报检索	14
预测地质学(人类未来环境预测)	12
图形分析及模型识别	10
地球化学	10
地质数据库	9
构造地质学	6
自动绘制地质图	5
水文地质学	3
遥感数据处理	2
物探	2

积分析定量技术”学术讨论会,1975年在法国举行了第二次同名的学术讨论会。在数学方法用于资源评价方面,1976年在挪威召开了第一次“资源研究中计算机应用标准化”讨论会,1977年在肯尼亚和1979年在墨西哥召开了第二、第三次上述问题讨论会。又比如,1977年在澳大利亚召开了第15届国际“计算机在矿业中的应用”讨论会等等。1980年在巴黎召开第26届国际地质大会的同时召开了国际数学地质学术讨论会,会上提交论文100多篇,其应用领域和论文篇数的情况如表1-1所示。

1984年在莫斯科召开的第27届国际地质大会上,数学地质学科组被划分为四个专题和三个相关联的学术讨论会。专题一是“地质过程数学模拟”,主要有两个方面:地质过程随机模型和地质过程计算机模拟。比较突出的成果是侵入体结晶过程数学模型的建立。专题二是“数学基础上的地质分类”,包括三个不同的方向:地质对象的多元统计分类法、启发式法及逻辑代数法。专题三是“地质统计学”,主要是研究矿床的变化性、特别是在矿床储量计算中的应用及其精度分析,矿床地质经济评价数学方法的应用等。专题四为“卫星遥感地质信息分析及其在地质制图中的应用”。三个相关的讨论会是:①应用计算机进行地质资源预测及评价;②地质信息:地质数据采集、存储、传递及应用;③侏罗系定量及定性地层对比。后者是IGCP第171及148专题组织的讨论会。可以看出,这次大会的论文对数学地质的实际应用给与了很大的关注。正当国际数学地质协会主席、E.H.T.惠顿在“数学地质的任务”一文中指出的:“数学地质领域的专家应致力于获取明显的实际效益,而不应满足于单纯的理论探索”。惠顿在文章的最后指出:“数学地质诞生已经25年,这25年由于计算机的应用而使数学地质有了长足的发展……但为了在下一个25年中使数学地质有更大的发展必须采用完全新的研究过程。即不是从毫无远见的立场出发,在现有的地质数据上去试验各种不同的数学方法,而应把对地质过程和地质对象的数学表达作为目的。只有这个目的达到了,数学地质才能成为地学中的重要学科,否则就只能像现在这样成为某种装饰品”。

在第28届国际地质大会上,数学地质学科组下也分为四个专题。“资源或储量地质统计学估计”被列入“资源、油、气、煤及其它矿床”的学科专题之下。但实质上可视为五个专题分组,总计论文为48篇。它们覆盖的学科方向和基本问题以及论文数如下:①多元分析的地质应用1篇;②人工智利及专家系统2篇;③地质过程数学模拟1篇;④数据库及地质数据管理系统3篇;⑤特异数据统计处理4篇;⑥矿产资源定量评价11篇;⑦地质数据合成4篇;⑧图象分析4篇;⑨地质统计学8篇及⑩其它10篇。从这次国际地质大会上提交的有关论文看,有以下几点是值得提出的:

1. 数学地质已涉足于国际型全球性研究大课题,也积极参与国际地质研究的“热门”领域。如“全球沉积岩数据库的建立”;“沉积盆地热历史”;“现代和古扩张中心的矿化”及“能源矿产及贵金属的寻找和评价”等。

2. 方法模型的研究仍受到重视。重点是研究地质数据综合化的信息合成法;数字化的图象分析法;人工智能化的专家系统法;稳健化的特异数据统计处理法、变量区域化的地质统计学法;量化的资源评价法等。

3. 进一步探讨适用于地质学的数学模型。如“地质学中的熵测度”、“地质过程的多谱模型”、“分带性岩体形成过程的数学模拟”等。

4. 定量地层学有了长足的发展。这是基础地质科学与数学地质相结合最成功的范例。

1992年8月在日本京都召开的第29届国际地质大会上,“地质数学与地质信息”学科组分

6个专题分组进行学术交流：①地质过程和事件的计算机模拟；②计算机图示及地球科学的三维分析；③地质数据的数学和统计分析；④地球科学数据合成；⑤地质数据管理及⑥地球科学中的数字制图。这次会议，在地质过程及事件计算机模拟方面的论文近20篇，约占数学地质论文总数的1/4，反映数学地质的这一方面近年来在国际上有了很大的发展。美国学者J.哈博的论文“沉积盆地模拟方法现状”指出，过去五年中，沉积盆地模拟的模型及方法有迅速发展，都用计算机生成图形显示所模拟的细节。陈旧一些模型是二维的，盆地的表示都是用垂直剖面，而新方法则都是三维的，可以表示河流或海洋水流运动，而且可以把沉积物搬运方程及流动方程联结起来，可以把控制实际盆地形成的地质全过程都包括进来，例如水流，波浪作用，侵蚀，水流中碎屑沉积物的搬运和沉积，碳酸盐的沉积与蒸发，压实和孔隙流体的排出、固结、均衡补偿以及构造变形等。另一些过程是烃类的产生和运移，风力搬运及沉积物的大量运动等。哈博的论文反映了地质过程计算机模拟的新进展。此外如“沿横推板块边界应力—运动学关系的半定量模拟”（法国Erik Calais）；“节理岩块风化过程计算机模拟”（日本，Shuichiro Yokota）；“褶皱和断裂地体计算机三维侵蚀模型”（法国Michel Perrin）；“用数理逻辑研究地质事件的计算机应用”（俄罗斯 Sirotinskaya）等论文反映计算机地质过程模拟应用范围广泛。在29届地质大会上，占比重最大的论文是“地质数据的数学和统计分析”，达28篇之多。其中代表性论文如“地质遥感的形态分析和多谱分类”（荷兰，Fabbri）；“连续空间模型的离散地质数据分析”（美国 Herzfeld）；“长距离与海洋数据分形分析”（美国 Fluegeman）；“定量与定性混合数据均质化分割的多元统计法”（俄罗斯 Rodionov）；“利用金属元素浓度计算深海—半深海—近海陆源沉积环境指数的数学途径”（日本 S.Yamamoto）；“矿床预测中筛分试验理论的应用”（保加利亚，S.D.Bakardjiev）；“哈萨克斯坦矿床计算机定量预测”（M.S.Tonkopiya）；“沉积物化学成分多元统计分析、构造部位模型”（印度 M.C.Ghildiyal）等。这些论文反映了当今地质数据统计分析应用范围之广：从基础地质问题研究到成矿预测及资源定量评价。

值得提出的是在“地质学史”学科组下设置了一个专题：“数学地质50年：金岁纪念”。这里显然与前述惠顿教授把1958年作为数学地质学科的诞生年不同。按照D.F.梅里亚姆在“定量地质学之报”一文的意见，数学地质的发展历史被划分为四个阶段：1833—1895为形成阶段；1895—1941为开拓阶段；1941—1958为发展阶段；1958至今为自动化阶段。1941年开始的发展阶段是以多元统计方法向地质学中的引入为标志，而1958年是以计算机地质首次应用为标志。无论如何，数学地质学科已日趋成熟。可以毫不夸张地说，当今地球科学的每一领域都或多或少应用了数学地质方法，当然，应用效果的显著性是各不相同的。

第二节 数学地质发展的必然性

任何科学的产生和发展都离不开人类最基本的生产实践活动。科学理论和方法都必须通过生产实践的反复检验才能显示其有效性和生命力。数学地质的产生和发展也有其客观的必然性。

1. 地质科学已经发展到定量地质学的新阶段

随着地质生产和研究工作的大量开展，各种新技术新方法的普遍应用，地质工作者已开

始面临“数字的海洋”。正确而迅速地处理数据，最大限度地获取有用信息已成为地质学科所面临的新问题。另一方面，地质科学的任务随时间的推移而发生了很大的变化。正如美国数学地质学家麦克卡门（1980）所说“如果说在过去地质学家可以安静地研究和冥思地球的历史，那么现在则要求地质学家对一系列社会问题的解决作出贡献。例如：及时地提供有关影响人类活动事件的性质、地点、规模和时间的信息，评价人类活动的环境影响以及评价自然资源量的大小等等”。上述任务的解决都要求地质学具有更大的预测性。近十年来，地质学的预测能力有了很快的增长，其中一项有关的发展便是地质学的定量化问题。

作为定量地质学，最基本的要求应体现在以下几方面：

①准确地定义地质体或地质现象 由于地质学的描述性质，许多地质体或地质现象缺乏严格定义，有时甚至因概念含糊不清造成理解上因人而异，这给地质分析、对比和解释带来很大困难。例如：深大断裂、次火山岩、绿岩、层控矿床、斑岩矿床、勘探类型……都没有公认的明确定义或是定义不够严密而易造成理解上的差异，这种例子在地质学中是不胜枚举的。从地质学的定量化角度来看，统一名词术语并给以准确严格的定义是十分必要的。当然，这项工作是非常艰巨的，但却是不可回避的。

②在解决各类地质问题中，给出数量的准则 以矿产预测为例，所谓“定量预测”，不仅要求确定成矿远景区的空间位置，而且应给出远景区可能发现矿床的个数或资源数量，给出在该远景区可能发现矿床的概率，并且查明控矿地质因素和找矿标志的数量规律性，如各因素或标志的信息量（信息权），各因素标志指示成矿或找矿的概率，各因素标志最有利成矿或找矿的数值区间等。例如岩层产状、岩石孔隙度、岩性组合特征值等各有其不同的变化范围，但不是所有这些值与矿化有同样的关系，应区分：①该因素对成矿的最优值区；②有利数值界限；③中常界限及④不利界限。大部分控矿因素最优值并不相当于它们的最大值或最小值。

其它如在解决分类、对比、判别等性质的问题中也都应有数量的准则。

③通过建立数学模型，检验地质理论和假说 有人认为地质理论和假说是“无法检验的”。从地质科学未来的发展来说，这种看法未必正确。地质科学与数学的进一步结合将有可能使地质理论和假说建立在更可靠，而且是可以检验的基础上。数学模型的最大用处恰在于此。例如1972年前苏联数学地质学家维斯捷利乌斯提出“理想花岗岩”概念，他应用Or—Ab—Q三种矿物组分在实验系统中结晶的可靠基础，计算穿过矿物集合体任意直线上的颗粒转移概率，证明Or、Ab及Q三相必定具有一种简单的马尔科夫性质，然后用实际花岗岩样品所测颗粒转移的经验数据与之进行比较，从而判断或检验花岗岩的各种成岩假说。

④正确处理地质数据 地质数据不仅在数量上是大的，而且很多属于多元数据。另外，大多数地质数据具有噪音强、混合性强、区域性强等特点。正确地处理地质数据，并从中发掘最有用的信息，恰为定量地质学的最重要任务之一。

2. 地质学中概率法则的重要性

地质学研究的对象，无论是各种地质体或地质现象以及各种地质观测结果，都普遍地受概率法则支配或影响。这就是说，地质现象、地质过程及其产物大多可视为随机事件，而各种地质观测结果则具随机变量性质。维斯捷利乌斯（1977）曾指出：“地质对象是由一些单个单元联合起来的，这种联合是遵循概率法则的”。的确，地质科学研究的对象都是在广阔空间、漫长时间和复杂介质中发生和发展的地质作用和产物，它们既受确定性法则支配，又

在很大程度上受偶然因素的影响,即受概率法则支配。因此,大多数地质观测值都可看成是既受系统性或规律性变化因素的影响,又受局部性或偶然性因素影响的综合叠加结果,用数学模型可表达为:

$$x_i = T_i + \gamma_i + \varepsilon_i$$

式中: x_i ——第*i*点观测值; T_i ——受系统因素影响的规律部分或趋势分量; γ_i ——受局部因素影响的异常部分或异常分量; ε_i ——受随机因素影响的偶然误差。

由上可见,地质规律大多具有“统计规律”的性质。就是说,它们服从一定的分布律,各种地质事件及观测结果在不同条件下发生的客观可能性或概率不同,要研究掌握它们发生发展和变化的规律,就必须借助于研究随机现象的数学工具——概率论及数理统计。

下面我们看两个实例:

①找矿工作与概率法则

矿床的形成和分布虽然由于受一定地质条件控制而具有某些规律性,但仍可将其视为受多种随机因素影响的随机事件。因此,在地质条件有利地区进行的找矿工作也必然受概率法则支配而具有一定的风险。根据国外一些统计资料,我们可以看到找矿失败或成功概率的一般状况,

——据国际原子能机构(1973)统计

对美国10万个异常进行了检查,从中获得4000个远景地(矿点),其中700个可列入矿床,因此,异常:矿床=143:1。找矿成功概率 $\approx 0.7\%$ 。

——据Koulomzine及Dagenais(1959)及Roscoe(1971)

加拿大公司经营的4865个矿床中,148个(约3%)是盈利的。

加拿大勘探工作发现矿床的比率1951年为1%,1969年下降为0.1%。

——据Perry(1968)

在美国西南部的五个勘探队检查了352个矿点,对47个进行了物探,23个进行了钻探,只判断其中的两个有可能开拓,成功比为176:1,即约0.6%。

——据Bailly(1967)

美国主要勘探公司(Bear Creek公司)1963—1966年间对1649个可能靶区进行了认真的考虑,对其中60个进行了钻探,发现了15个新的矿化区,其中8个有某些潜在储量,而5个为显著“矿床”。成功比为330:1,即约0.3%。

——据Griffis(1971)

加拿大Cominco公司在40年间勘探了1000个以上矿点,对78个进行了详细勘探,最后18个投入生产,但仅仅7个是可盈利的,成功比为0.7%。

以上是对矿点或异常进行勘探的成功比。若不是从矿点或异常出发,而是从一个区域出发进行找矿,成功的概率又如何?

以印度为例:从1976年开始的在80000km²范围内的一项勘察计划,经过10个月的航空电法、磁法和放射性测量,选择出1100个异常进行地面地质普查,至1972年夏对700个异常进行了地面地质、物、化探调查,发现其中25个值得进一步工作,1972年末对12个对象进行了钻探,其中8个被认为是希望的矿点,如果其中1个真正成为有价值的矿山,则原始风险为1100:1。一般说来,而积性地质调查的成功比如下:区域评价(1000:1),远景区普查(500:1),详查(100:1)。

显然，找矿成功比还是时间的函数。

②区域评价与概率法则

一个地区是否值得进一步进行普查勘探工作，一方面取决于地质评价的结果，而另一方面又必须考虑可能的经济效果。可以说，区域评价是一项在不确定条件下进行统计决策的工作。这里的不确定性主要受找矿概率的制约。

设在一个地区进行找矿，其可能找到矿床的概率和可能找到不同价值矿床的概率如图1-1所示。影响矿床价值的主要因素这里主要考虑了规模大小、品位和埋深。这些因素的变化，造成现值差异幅度很大。

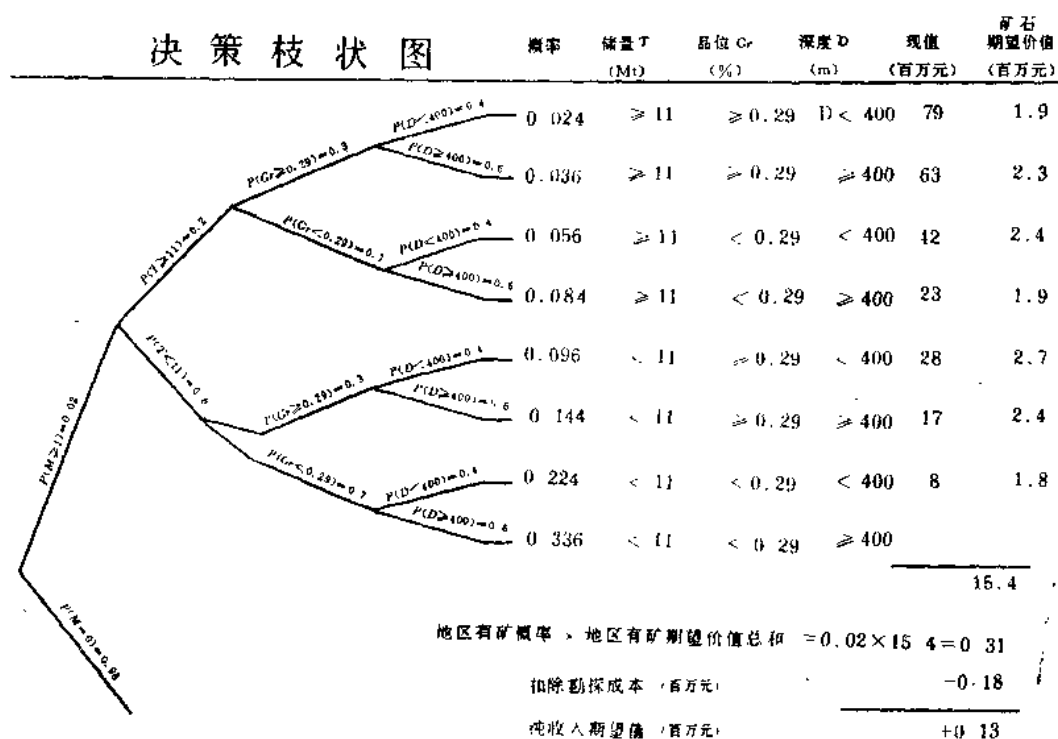


图 1-1 找矿决策枝状图及找矿纯收入期望值的计算

由图1-1可见，影响决策的关键因素是①成本；②优劣比（找矿概率）及③报酬（期望价值）。还可以看到：理想的找矿对象，如规模大、品位高并埋藏浅的矿床尽管具有较高的价值，但一般地说这类矿床数量少，发现这种对象的概率很低，从而降低了最终的期望价值。因此，对于很少机会发现的高价值矿床的探矿工作应建立在充分地质研究基础上并进行可行性分析。如果找矿优劣比为1:100，则对于10万元的勘探费用，寻找的目的应该至少具有现值1000万元。当优劣比更差时，则预期目标的现值应更高，或是找矿成本必须更低才可进行。这一实例，充分说明对一个地区进行评价，决策普查勘探工作部署时概率法则的明显支配作用。

3.地质研究中的抽样观察是最基本的工作方法

从获取原始资料的最基本方法来说，地质观测是在一定间距的点或线上进行的，通过点与线上资料的内插和外推，或通过确定某种平均特征来表示地质体的空间展布或代表地质体的某种属性。换句话说，地质工作的基本方法是通过抽样观察来推断总体，即使是现在利用

航空或卫星遥感技术，开始对地壳进行面的观测，但对于深部的情况来说，它仍然是一个局部。显然，任何地质观测结果都不可避免地存在有“代表性误差”。只要保证抽样的随机性，那么这种误差也带有随机性质，从而具有一定的概率分布。因此，各种观测结果也是带有不确定性的随机变量。我们在大多数情况下只能以一定的概率作出具有一定精确程度的结论。这就是数理统计中所常用的“区间估计”。区间越窄，估计的精度越高，但落入此区间的概率就越小，或者说结论的可靠程度越差。我们知道，区间大小取决于 $t \cdot s / \sqrt{n}$ 。在观测值数量 n 不变，对可靠程度要求一定 (t 一定) 的情况下，标志的变化程度 S 越小，则所作估计的精度越高。另一方面，若变化性 S 及 t 为固定的，则提高精度的途径只取决于增加观测数量 n ，所以我们对各种观测结果或研究结果都要进行一种精度评价和可靠性评价。当置信区间不太宽，可靠程度不很低时可求出最佳解。

迄今为止，人们往往忽视对观测结果或各种估计作出精度和可靠程度的分析，这可能导致错误的结论和推断。

例如，在一交代蚀变花岗岩体内取样，样品数 $n=12$ 。根据此样品计算 Th、Cu 两元素的平均含量 ($\bar{x}$)、标准差 (S)、变异系数 (V) 以及概率系数 $t=2$ (可靠程度为 95%) 条件下估计平均数的绝对误差 (m) 和相对误差 (p) 示于表 1-2。

表 1-2

元 素	$\bar{x}$ (ppm)	S (ppm)	V (%)	$m_{0.05} = 2 \times \frac{S}{\sqrt{n}}$ (ppm)	$p = \frac{m}{\bar{x}} \cdot 100(\%)$
Th	26	4.05	16	2.3	8.8
Cu	52	72.6	140	42.0	80.7

由上表资料可见，根据 12 个样品所计算的两元素平均含量的误差差别很大，对于 Th，平均数精度较高，其相对误差 $< 10\%$ ，而 Cu 元素平均数误差很大，达 80% 以上，这是由于 Cu 元素在该花岗岩体内较之 Th 有更大的变异性。为了提高确定平均数的精度，则必须增加取样数量。因此，如何能够获得正确的观测结果以及如何评价已经取得的观测结果是十分重要的问题。

由上可见，数学地质的产生和发展乃是生产发展和地质科学进步的客观需要和必然结果。

第三节 概率统计中的某些基本概念

下面结合一些实例，回顾若干最基本的名词和概念：

1. 总体与样本

假设我们从一个矿体上采下一组刻槽样品，或从一个花岗岩体上采下一组岩石标本，并测定这些样品或标本中的某个 (或某些个) 指标值，得一系列测定值。这个矿体或岩体上这种指标可能取得的一切值的集合在数理统计中称为总体，由样品或标本上所得到的测定值称为样本；显然，样本是总体的一个子集合。为了方便，我们也常把整个矿体或岩体称为总体，把所取的一组样品或标本称为样本。但是有时需要根据研究目的对所研究对象进行更具