

金矿应用地质学

王建国 等编著

东北大学出版社

号8第字登储(五)

金 矿 应 用 地 质 学

王建国 侯根群 赵纯福 邱玉民 于明旭

周乃武 沙成满 甘盛飞 刘 辉 毛冬青

东北大学出版社

(辽)新登字第8号

图书在版编目(CIP)数据

金矿应用地质学/王建国等编著. —沈阳:东北大学出版社, 1993.12

ISBN 7-81006-691-9

I.金… II.王… III. ①金矿床-应用地质 ②应用地质-金矿床 IV.P618.510.5

◎东北大学出版社出版

(沈阳·南湖 110006)

沈阳工业学院印刷厂印刷 东北大学出版社发行

1993年12月 第1版 1993年12月 第1次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 7.5

字数: 184千字 印数: 1~200册

定价: 12.00元

序 言

地质系毕业实习教学是学生能力培养,使学生毕业后能尽快独立工作的关键环节。而我们现在的教学工作仍是按沿化多年的教学大纲进行授课,另外随着现代基础科学和应用技术的高速发展,新理论,新测试方法也不断地应用于地质找矿之中。《金矿应用地质学》一书正是为弥补理论教学的空缺,加强实践能力方面的知识而编写的。

《金矿应用地质学》全书共十章,主要包括数学地质、构造地球化学、成因矿物学、同成矿构造预测、流体包裹体、稀土元素地球化学、同位素地球化学等学科的基础理论简介,在此基础之上详细论述了诸学科在金矿成因,金成矿预测研究方面的应用方法,应用原则和解决的主要问题,并且在书中介绍了各学科的最新研究成果和应用实例。在最后章节中对某些测试方法的送样要求,测试的具体工作要求进行了叙述。

本书由王建国拟定编写提纲,然后分章节由不同作者编写,第一章:侯根群;第二章:赵纯福;第三章:于明旭;第四章:沙成满;第五章:毛冬春;第六章:王建国;第七章:邱玉民;第八章:周乃武;第九章:甘盛飞;第十章:刘辉;最后由王建国、邱玉民统一整理成稿。本书由于不同章节为不同人编写,再者由于编者的水平有限,在内容上可能有很多不妥之处,请各位读者批评指正。

1992年12月

目 录

第一章	数学地质方法在金矿找矿研究中的应用.....	(1)
第二章	构造地球化学在金矿研究中的应用.....	(10)
第三章	成因矿物学在金矿成矿规律及成矿预测中的应用.....	(19)
第四章	同成矿构造及其在金矿成矿预测中的应用.....	(32)
第五章	流体包裹体及其在金矿研究中的应用.....	(43)
第六章	稀土元素地球化学及其在金矿研究中的应用.....	(50)
第七章	同位素地球化学在金矿研究中的应用.....	(64)
第八章	地质科研思维及其工作方法厘定.....	(85)
第九章	变质作用与金的成矿.....	(92)
第十章	金矿床矿物研究中常用的几种测试方法简介及样品送测指南.....	(105)

第一章 数学地质方法在金矿 找矿研究中的应用

一、概 述

数学地质方法是50年代末、60年代初逐步形成的介于数学、地质学之间的一门边缘学科。数学地质方法的出现，使地质学从传统的定性描述和成因推理进入到以数学为工具，以电子计算机为手段定量研究地质问题的新阶段。当然，由于地质问题的复杂性及数学方法的局限性，许多数学地质方法仍具有探索性，有待于进一步深入研究。

关于数学地质方法的任务和研究内容，至今没有一致的看法。概括起来有两种观点：“广义观点”认为它是，用数学方法研究解决地质问题（F.P 阿格特伯格，1974年）；另一些学者（如 A.B 维斯捷利乌斯，1977年）则强调必须严格区分数学地质和地质学中的数学。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“狭义观点”。国内大部分学者的观点是“广义观点”。这里以赵鹏大教授的观点给出数学地质方法的定义：数学地质是研究地质运动数量规律性的科学。它以数学为工具，以计算机为手段，以解决地质问题为目的。数学地质解决地质问题的一般模式是：

地质问题（模型）→数学问题（模型）→地质解释

上述关系说明，数学地质方法必须以地质为基础，转化地质问题为数学问题进行统计计算，通过对计算结果的分析解释，达到解决地质问题的目的。

近年来，由于电子计算机的逐步普及，数地方法得到了广泛的应用和发展。现阶段从应用角度可划为三个分支：

1. 定量地层学：主要研究与地层有关的问题，寻找与沉积作用有关的矿产（如煤，石油等）应用的数学工具主要为马尔柯夫模型。
2. 地质统计学：主要研究储量计算问题，应用的数学工具主要为区化变量理论和变异函数。
3. 矿床统计预测：即用数地方法和理论进行矿产预测。用到的数学方法分为两大类（1）处理定量变量的数学方法，主要为各种多元统计分析方法；（2）处理定性变量的数学方法，如特征分析，逻辑信息法，数量化理论等。

由于课和限制，我系在《数学地质》课程中所讲内容主要是矿床统计预测中用到的多元统计分析方法，其它分支的内容未能涉及。

多元统计分析方法和地质科学中的应用主要解决以下三个方面的问题：

1. 解决分类问题。分类问题是地学研究中的一个重要课题，如岩浆岩的分类，地

质体及物化探异常含矿性评价分类等。多元统计分析解决分类问题的实质主要是决定样品或变量的归属问题。

2. 研究变量间的相关关系。通过对地质体内各种地质指标(变量)的研究,了解它们之间的关系并进行有效的地质解释。

3. 简化结构。目的是从大量的指标中综合出少数起主要作用的综合指标,为地质分析提供定量依据。

鉴于篇幅限制,本文主要介绍回归分析、判别分析和因子分析三种多元统计分析方法在金矿研究中的应用。通过具体地质实例,使同学们了解这些方法可解决何种地质问题,遇到具体地质问题后如何进行方法选择,计算结果的地质解释及应用中应注意的问题。对于各方法的原理只做梗概介绍,至于具体计算步骤由于课堂上已做详细讲解这里不作介绍。顺便指出,多元统计分析方法的计算量是很大的,尤其是当变量和样品较多时,手算是很不方便或者说是不可可能的。要想很好的运用这些方法去解决地质问题,除了搞清方法原理和密切结合地质实际外,还需具备一定的程序设计和计算机使用能力。

二、回归分析

(一) 方法原理

在地质研究中常遇到一些处于同一地质体中的多个变量,如分析一块矿石中成矿元素和伴生元素的含量等,在同一地质体中,这些变量是相互联系相互制约的,客观上存在着一定关系。变量之间的这种关系大致可分为两种类型:一是确定性关系,如岩石的电阻率 ρ_s 和供电电流 I 及测量电位差 ΔV 之间的关系为 $\rho_s = K \frac{\Delta V}{I}$ 对于自变量 ΔV , I 的每一个值因变量有唯一 ρ_s 的值与之对应。另一种关系是相关关系:变量之间具有某种依赖关系但又具有某种不确定性。如成矿元素与伴生元素之间的关系,原生晕的强度与距矿体远近之间的关系等都属于这种相关关系。

基于地质问题的复杂性,大部分地质变量是随机变量,它们之间的关系大都具相关关系,不能用数学分析中的函数关系表示。如在某石英脉型金矿中Au、元素对Cu、Pb、As、Co等元素有依赖关系,但不存在确定性的函数关系,只能是相关关系。只能根据若干块标本的化验值,找出这种相关关系的数学表达式,并度量出变量之间的依赖程度,这对研究该矿床是很有意义的。

回归分析是研究这类相关关系的有利工具。它是以若干变量的观测数据为出发点,通过研究这种数据结构,寻找变量间存在的规律性关系。概括的说,回归分析是研究变量间统计相关关系的一种多元统计分析方法。

应用回归分析主要解决下列三方面的问题:

1. 研究变量间的相关关系。根据所获得的观测数据用数学方法找出因变量对诸自变量的依赖关系,并用数学式子表示出来,即建立回归方程。

2. 检验变量相关的显著性。对变量之间的相关性进行检验,这包括研究因变量与

全体自变量的相关关系，也包括因变量与各自变量的相关关系。

3. 用自变量的已知数值对因变量进行预测。

(二) 应用实例

实例一：甘肃某金矿含金石英脉含矿性预测

该矿床有较长的开发史，地质部门先后不同程度的对14条矿脉进行过评价。矿区内石英脉繁多，两个成矿后期的NE向断裂将矿区分成西、中、东三个矿段。研究表明，矿床系产在一个小背斜构造的东端。背斜的核部为辉绿岩，它与成矿有关。外围为下二叠统变质细砂岩。含金石英脉几乎由乳白色石英组成，金属硫化物少见。金一般很细小，很难见到明金。宏观上难以辨别石英脉的含金性。

区内石英脉很多，如何快速有效的评价这些石英脉的含矿性是本区找矿的关键。考虑到脉内金矿物细小及全面取样做定量分析成本高等情况，开展评价时，无论从时间上还是从经济上都不允许按部就班的逐一对每条脉做详细评价。因此有必要采用数地方法，在前人工作的基础上，补充某些简单的取样化验工作，而对全区石英脉的含金性做出定量估计，通过估计进一步缩小评价目标，并选择含矿性好的矿脉作全面的地质评价工作，以达到快速评价的目的。

原始数据的收集是以单个石英脉为对象（即每条脉做为一个样品）。已知矿脉是利用前人取样化验结果计算出Au的平均值。另对区内石英脉逐条进行检块取样，作光谱分析，分析8种元素（Cu、Pb、As、Co、V、Ti、Mn、B），以平均值代表各脉元素的含量。已知矿脉14条，这样就得到了14个样品、9个变量的原始数据表（略）。

需要解决的问题是由14条已知脉上的原始数据，找出Au元素与其它8种元素之间的关系，然后对未知脉的Au含量进行估计，自然要用回归分析来解决这一问题。以Au元素为因变量，以另外8种元素为自变量，根据已知脉上的原始数据建立回归方程如下：

$$1gAu = 0.981 - 0.381gCu - 0.031gPb - 0.111gAs - 0.431gCo - 0.021gV + 0.161gTi + 0.0581gMn + 0.251gB$$

经F检验，方程回归效果显著，可用来进行预测。

从这个方程可看出，与Au正相关的元素：B、Mn、Ti；反相关的元素有：Cu、Pb、As、Co、V，且在相关元素中以B与Au的正相关性最强。这与对该区的地质认识是一致的。

将未知脉的8种元素含量分别代入方程得到各脉金含量的估计值。部分结果见表1-1。

表 1-1 脉含矿性预测和评价检查结果对照表

矿 段	矿 脉 号	石英脉 Au 含量预测值 ppm×10 ⁻⁵	评 价 检 查 结 果 ppm×10 ⁻⁵		
			石 英 脉	上盘蚀变带	下盘蚀变带
西 矿 段	1	3.21	1.44	3.88	7.44
	25	3.30	3.45	2.6	7.55
	6	2.75	2.06	0.98	3.20
中矿段	46	2.96	2.33		1.00
东 矿 段	60	3.58	3.32	2.90	2.9
	63	8.3		12	12

显然，应选择Au估计值较大的脉体进行评价。根据预测结果，结合其它地质资

料, 有关部门对部分脉体进行了进一步评价, 结果见表 1-1。可见预测含矿情况与实际评价含矿情况基本一致, 说明了方法的有效性。

实例二: 内蒙某金矿含金石英脉剥蚀深度预测

对于石英脉型金矿含矿性评价应包含两个方面的内容: 一是脉体含金性的好坏的评价(上例), 再就是脉体剥蚀深度评价问题。因为尽管某脉Au含量高, 但已蚀到矿体尾部, 那么这条脉也意义不大; 反之如果一条脉尽管Au含量不高, 但是矿体头部, 那么这条脉也很有意义。所以, 对矿脉剥蚀深度评价问题是对矿脉评价的一个重要方面。回归分析可做为解决这类问题的一种手段。

用回归分析解决这一问题, 是建立在矿体元素垂向分带基础之上的, 下面通过实例来说明这一问题。

内蒙某金矿为石英脉型金矿, 矿区内发现石英脉150余条, 但仅有10余条进行过评价和工程验证。为了评价这些未知脉的含矿性, 用回归分析方法进行了剥蚀程度估计。

首先选择已开采的H₂号脉为模型(已采到六中段), 在各中段系统采样, 分析出Au、Ag、Zn、Ni、Co、Cr、As、Sb、Hg等15种元素的含量。用格立戈良法及其它数地方法研究元素的垂向分带性, 总结出了能反映矿体垂向变化的元素对比值: Zn/Ag、Ni/Co、Cr/Co。以矿脉各中段标高为因变量, 以各中段这些元素对比值为自变量, 建立了回归方程:

$$H = -67.07 + 1.695 \frac{Zn}{Ag} + 1.13 \frac{Ni}{Co} - 0.53 \frac{Cr}{Co}$$

经F检验, 方程回归效果显著。

可用这个方程对未知脉的剥蚀程度进行估计。对未知脉采样化验方程中元素的含量, 代入方程可得到一个标高H值, 如果计算出的H值与模型矿体头部标高相当, 则可推测这个矿脉剥蚀深度不大; 如果计算出的H值与模型矿体的尾部标高相当, 则矿体剥蚀较深。

(三) 应用中应注意问题

1. 回归分析, 同其它多元统计方法一样, 是通过已知样品寻找统计规律。所以, 已知样品应有足够的数量, 一般不应低于30个, 至少不能少于自变量的个数。
2. 在用回归方程进行预测时, 应注意地质环境的相似性, 只有在这个前提下才有可能取得好的预测结果。如剥蚀深度预测问题。只有当模型矿脉和预测矿脉成矿环境等方面相似时预测才有意义, 反之, 则无意义。如果研究区有多种类型的矿脉, 则应按不同类型分别建立回归方程进行预测。

三、判别分析

(一) 方法原理

判别分析是一种对样品进行分类的方法,它解决的基本问题是判定未知样品的归属。地质找矿中许多问题,如判断物化探异常或各类地质体含矿性好坏等,都可考虑用这种方法解决。

根据地质对象的某一数字特征(变量)对研究对象分类在数学上实现起来比较简单。如不同斜长石的变种中,钙长石的分子含量有明显差异,单用这个含量值做为变量就可把斜长石的不同种类(母体)区分开。但在大多数情况下,用单变量区分两母体是不容易的。这就和区分不同民族的人一样,如果单用身高一个变量区分,可能很难区分开,但如果考虑体重、身长、脸部特征等多个指标就易区分。这就是说用单变量判别不同母体判别标准好定,但效果不好;用多变量判别效果好,但由于变量之间的关系复杂,单凭简单的逻辑思维判别标准不好确定。判别分析就是为了解决这个矛盾,用适当的数学方法从多个变量中提取出有关判别分类的信息,综合成一个象单变量情形那样好用的判别标准——判别函数。

判别分析分为多类判别和二类判别。其建立判别函数的数学准则不同。二类判别通常按Fisher准则建立判别函数;多类判别按Bayes准则建立判别函数。

(二) 应用实例

实例一:辽宁某金矿盲矿体统计预测实例

该金矿区内大面积分布黑云母花岗片麻岩,近南北向的含金石英脉成群成带发育。矿脉严格受断裂构造控制。北北东向张扭性复合裂隙和北西张扭性复合裂隙是矿区的主要控矿构造。矿床类型主要为含金石英脉型金矿,具有多次矿化的特点。主要金矿物为自然金和银金矿,共生矿物主要有硫铋铅矿、辉铋矿、辉钼铋矿等。铋矿物是金的载体矿物。

在找矿勘探中,根据原生晕数据,用二类判别对盲矿体及矿脉深部进行了定量评价。

1. 已知母体的选择。主要考虑矿脉的头部和尾部,同时考虑两组主要控矿构造及不同地段,共选择了有充分工程控制的20条已知矿脉(含矿,不含矿各10条)作为计算判别函数的已知母体。

2. 变量的确定。主要考虑元素的分带性,同时考虑矿化阶段和含矿地质体的特征元素,对某些元素进行组合形成变量。

3. 计算方法。由于组合晕比单元素晕更能反映异常的特点,所以用累乘含量组合做为变量建立判别函数如下:

$$Y = 4.58(As, Ag) - 4.95(Au, Bi) - 20.9(Cu, Pb, Zn) - 5.8(W, Ni)$$

$$Y_0 = -10.29; Y_{\#} > Y_0 > Y_{\# \text{非}\#}$$

经F检验，方程差异性显著，已知样品回代正确率82%。在这个判别函数中，四个变量（9个元素）参加计算，As、Ag表征头部元素特征；Au、Bi为主成矿元素；Cu、Pb、Zn为尾部元素；W、Ni为含矿地质体特征元素组合。

建立判别函数后，可对盲矿体及钻孔深部进行含矿性预测，通过对矿区42号脉深部评价的实践表明，证明判别分析在矿区找矿勘探中确实可当作一个比较直观的依据。已做出17个判别，有13个得到验证。判别分析的结果基本反映客观实际。如516线，1978年施工的1599孔未见矿，但经计算判别得分 $Y > Y_0$ ，说明下部有望，于是在1979年继续施工了后排1598号孔，结果在预计部位见到了2.7m厚的含金石英脉工业矿体。而1598孔深部判别得分 $Y < Y_0$ ，说明下部无望，后来的1569孔确实未见矿，证明矿体已尖灭（见图1-1）。预测的17个工程部位，13个得到验证，成功率为百分之百。之所以如此，主要是用于判别的变量选择适当，能反映客观实际。实际上，本项工作也用多种组合变量，建立了各种判别方程，上式给出的判别方程是判别效果最好的一个。

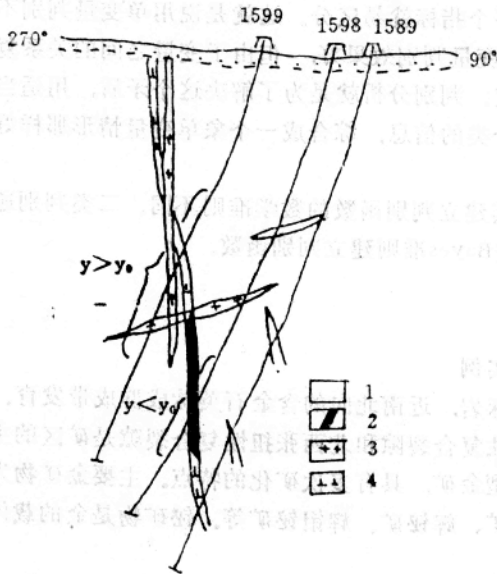


图1-1 某矿516线地质剖面图

1—黑云花岗片麻岩；2—含金石英脉；3—花岗岩；4—闪长岩

建立判别方程如下：

$$Y = 0.069 \ln(Ag \cdot As) - 0.018(Au \cdot Te) - 0.02 \ln(Cu) - 0.015 \ln Mn$$

$$Y_0 = -0.496; Y_{\# \text{上}} > Y_0 > Y_{\# \text{下}}; F \text{检验结果差异显著。}$$

用上述判别方程对玲珑矿田和望儿山矿床的已知矿体上部晕7个剖面 and 已知矿体下部晕5个剖面158个样品进行了判别，结果判对149个，判错21个。正确率达88%。结果表明，用上述判别模型区分矿体上部晕和下部晕。能得到正确的结论。

实例二：矿上晕和矿下晕的判别

在地化找矿过程中，指示元素及成晕特征确定后，如何区分矿体上部晕和矿体下部晕？即对于未知脉，化验出成矿元素，确定出其为成矿晕后，如何判别其为矿上晕还是矿下晕？这对脉体的含矿性评价无疑是具有意义的。判别分析可做为解决这一问题的一种手段。

如在招掖金矿带上，为解决矿上、下晕的区分问题，在玲珑矿田大开头矿段52号脉83剖面上采集了19个已知矿上部晕样品，11个已知矿下部晕样品，把它们看或A、B两总体，以原生晕经验模型为依据，确定 $\ln(Ag \cdot As)$ 、 $\ln(Au \cdot Te)$ 、 $\ln(Cu)$ 、 $\ln(Mn)$ 为判别标志（变量），建

(三) 应用中应注意的问题

1. 判别分析和Q型聚类分析都是对样品分类的方法, 其区别在于判别分析要求有已知类别的样品, 而Q型聚类无此要求。在判别分析中, 各类已知样品的类型应尽量确定准确。

2. 判别效果的好坏, 关键取决于所选变量区分母体的能力, 所以变量的选择十分重要。应选择那些区分母体能力强的变量参加判别, 这除了要求对工作区的地质情况深入了解外, 还应多做试验, 做出各种组合变量进行分析对比, 选择性能优良的变量建立判别方程。

3. 同回归分析一样, 模型区和预测区应有相似的地质环境。

4. 各类已知样品数至少不应小于变量数。

四、因子分析

(一) 方法原理

因子分析是通过少数的理论变量(公因子)代替实际变量, 研究变量或样品组合关系的一种多元统计分析方法。

在地质研究中, 常需要许多个变量才能较全面的刻划研究对象, 但由于变量多, 不易看出其之间的关系, 不易找出起主导作用的变量。因子分析, 提供了一种简化变量结构的方法。即将许多变量组合成少数公因子, 这些因子是原始变量的组合, 各因子给出了地质变量的几种基本组合关系, 往往表示对地质问题起主导作用的几个基本地质因素。这对元素的共生组合关系的研究, 成矿阶段的划分及成因推理有一定的意义。

这种因子简化变量的思想。实际上地质工作中早就采用了。例如在研究碳酸岩类的成份时, 可用组成石灰岩的几种元素C、O、Ca、Mg、Si为变量, 但这不能反映它们之间的客观联系。如果用它们组合成化合物 CO_3 、 MgCO_3 、 SiO_2 作为新变量, 就可很好的表达各种成份的石灰岩。这样做既减少了变量, 又反映了事物的本质。在一般的复杂的情况下, 因子分析方法可使我们从数学角度得到合理的反映客观规律的新变量。

因子分析也分为Q型和R型, 这里仅介绍R型因子分析的应用。

(二) 应用实例

因子分析在内蒙某金矿找矿预测中的应用

该金矿主要为含金石英脉型金矿, 产于斜长角闪片麻岩和混合花岗岩的接触带中, 矿脉受南北向断裂构造控制。该区已发现石英脉近百条, 但仅十余条进行过评价, 这里用因子分析的方法对未知脉的含矿性进行的预测。

通过对典型已知矿脉的研究, 已确定矿体的头、尾及矿上晕元素组合特征。

对全区内各地表出露石英脉系统采样106件, 分析了Au、Ag等十三种元素的含量,

进行了R型因子分析，方差极大因子解见表1-2。

表1-2 正交旋转因子解

因子 \ 变量	Zn	Cu	Ti	Mn	Co	Cr	Pb	V	Ni	As	Sb	Au	Ag
F ₁	0.76	0.12	0.07	0.03	0.06	0.02	0.35	0.03	-0.01	-0.01	-0.09	0.97	0.84
F ₂	0.02	0.14	0.99	0.19	0.91	-0.03	-0.75	0.97	0.41	-0.05	-0.04	-0.05	0.29
F ₃	-0.52	-0.17	-0.01	0.002	0.08	-0.2	-0.92	-0.004	0.07	-0.03	-0.89	-0.15	-0.46
F ₄	-0.14	-0.01	-0.02	-0.02	-0.03	-0.04	10.07	-0.03	0.24	-0.99	0.15	0.05	-0.01

由上表知在F₁因子轴上具有高载荷的变量是：Au、Ag、Cu、Pb、Zn、F₂因子轴上：Ti、Co、V、Ni、Ag；因子轴上：Zn、Pb、Sb、Ag。结合典型矿脉原生晕研究结果可知F₁代表的元素组合主要反映矿体特征，F₂代表的元素组合主要反映矿体尾晕特征；F₃代表的元素组合反映矿体头晕特征。对于某一石英脉样品，如果其在F₁上得分较高说明其矿化较好，在F₂的得分高说明其已接近矿体尾部，F₃上得分高说明其处于矿体头部，所以一个好的矿脉应是在F₁、F₃上得分高F₂得分低，反映其矿化且处于矿体头部。已知矿脉的结果亦证明了这一点。如在主矿体H₂号脉上其在F₁、F₃上得分很高，在F₂上的得分很低。根据这个原则，我们将各脉的F₁、F₂、F₃因子得分（原始数据略）分别连成等值线，圈定出F₁、F₃得分的高值区和F₂得分的低值区，吻合地段即是成矿的有利地段，得到了一些预测靶区（图略），其预测结果和地质认识一致。

通过这个例子可以看到因子分析简化结构的作用。如果不进行因子分析，我们必须在13个元素的基础上圈靶区，且各元素的关系不易搞清，各元素的地质意义不明确。通过因子分析我们把13个元素简化成了三个组合元素变量（因子），而且各因子的地质定义明确，用三个公因子代替了13个原始变量，信息损失不大，突出了成矿作用的主导因素，靶区的圈定原则也易确定。

五、几点说明

1. 为了使同学们理解方便，这里是按各方法分别叙述举例，实际上各方法之间是联系的，实际应用中应注意多种方法同时应用，起到相互验证补充的作用，使所得结果更加符合地质实际。

例如：回归分析、R型因子分析、R型聚变分析、对应分析、典型相关分析都可用来研究变量间的关系，它们是从不同的角度，不同的侧面，用不同的手段来刻画变量之间的关系的；Q型聚类分析、因子分析、判别分析、对应分析等都可用来研究样品之间的关系，同样它们也是从不同角度，用不同的数学工具来表述样品间的相似程度的，所以，无论是从各方法的数学原理上，还是从我们的研究对象——地质问题的复杂性上考虑，多方法的同时使用是非常必要的。

2. 用数学方法研究地质问题, 能否取得好的效果的重要问题之一就是所选变量能否全面正确的刻画研究对象的特征, 及计算结果的地质解释。所以数学地质方法必须以地质研究为先验前提和落脚点。

3. 鉴于地质问题是以定性描述为主的学科, 所以, 处理定性数据的方法就显得尤为重要, 这方面的内容有待以后补充。另外几种多元统计方法也有待以后补充。

内容提要及主要参考文献

参考文献 (一)

1. 王德滋, 1981, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
2. 王德滋, 1982, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
3. 王德滋, 1983, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
4. 王德滋, 1984, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
5. 王德滋, 1985, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
6. 王德滋, 1986, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
7. 王德滋, 1987, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
8. 王德滋, 1988, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
9. 王德滋, 1989, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
10. 王德滋, 1990, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
11. 王德滋, 1991, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
12. 王德滋, 1992, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
13. 王德滋, 1993, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
14. 王德滋, 1994, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
15. 王德滋, 1995, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
16. 王德滋, 1996, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
17. 王德滋, 1997, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
18. 王德滋, 1998, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
19. 王德滋, 1999, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
20. 王德滋, 2000, 数学地质学, 地质出版社, 北京。

内容提要及主要参考文献 (二)

1. 王德滋, 1981, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
2. 王德滋, 1982, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
3. 王德滋, 1983, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
4. 王德滋, 1984, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
5. 王德滋, 1985, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
6. 王德滋, 1986, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
7. 王德滋, 1987, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
8. 王德滋, 1988, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
9. 王德滋, 1989, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
10. 王德滋, 1990, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
11. 王德滋, 1991, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
12. 王德滋, 1992, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
13. 王德滋, 1993, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
14. 王德滋, 1994, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
15. 王德滋, 1995, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
16. 王德滋, 1996, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
17. 王德滋, 1997, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
18. 王德滋, 1998, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
19. 王德滋, 1999, 数学地质学, 地质出版社, 北京。
20. 王德滋, 2000, 数学地质学, 地质出版社, 北京。

第二章 构造地球化学在金矿研究中的应用

一、构造地球化学概念、研究内容、意义及发展方向

(一) 构造地球化学

构造地球化学是从事研究各种地质构造作用与地壳中化学元素的分配和迁移、分散和富集等关系的一门介于构造地质学与地球化学之间的边缘科学。它的主要任务是研究地质构造作用与地球化学过程之间,也就是运动和物质之间,在时间、空间和成因上的联系,把形成与形变、建造与改造统一起来加以研究。在这里,地质构造指大地构造运动、地壳运动类型、构造单元、构造区、构造体系、壳体、褶皱、断裂、裂隙(节理、劈理、片理)、微构造(显微构造、显微裂隙等)以及火成岩体构造等;地球化学指地球深部和浅部的物质反应(化学反应、核过程等),以及元素的形成、分配和迁移、分散和富集等。显然,构造地球化学的研究,一方面,包括了从构造的角度来研究地球化学,即在构造作用中的地球化学过程;另一方面,它又包括了从地球化学角度来研究构造作用,即由地球化学过程所引起的反映出的构造作用。其研究的目的,是要揭示出有用物质组分在各种构造环境中的赋存规律,作为指导找矿、勘探、成矿预测和生产开拓的依据之一。

简单地说,构造地球化学是研究地球物质的运动特征和运动物质的状态和规律,研究构造运动和物质运动的关系、性状和规律。

(二) 构造地球化学研究的内容

构造地球化学研究内容非常广泛。陈国达教授(1984)将构造地球化学分为以下十二个方面的研究内容:

- (1) 微构造地球化学;
- (2) 裂隙构造地球化学;
- (3) 断裂构造地球化学;
- (4) 褶皱构造地球化学;
- (5) 火成岩的构造地球化学;
- (6) 成矿构造地球化学;
- (7) 深部构造地球化学;
- (8) 地震构造地球化学;
- (9) 大地构造地球化学;
- (10) 宇宙构造地球化学;
- (11) 实验构造地球化学;
- (12) 应用构造地球化学。

若从研究规模大小来说,可大致划分为以下四个方面:

1. 宇宙构造地球化学;
2. 全球构造地球化学;
3. 区域构造地球化学;
4. 矿田、矿床或褶皱、断裂构造地球化学;我们这里主要介绍矿田、矿床或褶

皱、断裂构造地球化学。其研究在矿田、矿床或褶皱、断裂构造形成发展过程中，岩石、矿物、元素的地球化学特征，以及它们在时间和空间乃至成因上的联系。

(三) 构造地球化学研究的意义

构造地球化学研究，无论从实际应用上还是从学术理论上都具有十分重要的意义和作用。

它的实际意义在于，可以使人们认识到，在地球运动过程中不仅存在着物理作用和变化，同时还存在着地球化学作用和变化。打破了“构造在控矿中主要是提供各种流体（包括成矿溶液）运移的通道和成矿物质沉淀、富集的场所”的传统观念，认识到：“构造活动是完成某些地球化学作用的驱动力。”通过构造地球化学研究，可据以探索化学元素在地壳中的运动特征及其在地质时间、空间上的分布规律同地壳构造发展之间的相互因果关系，这将有助于了解各种地质构造作用在地球化学方面的成矿特点和成矿元素活化、迁移、富集规律，从而为研究成矿规律，为找矿、勘探及成矿预测提供依据。

构造地球化学的理论意义，首先在于，它使我们有可能根据地质构造与地球化学的关系，反过来认识地壳中元素的分配和迁移对构造形成发展的影响。其次，根据地球构造运动与物质运动关系的研究，可以提供有关矿床成因、成矿规律的一些新的认识，进一步丰富成矿理论。

(四) 构造地球化学研究状况及其发展方向

构造地球化学是一门新兴的发展中的科学。60年代初，人们注意到了不同大地构造演化阶段火成岩中的元素含量不同。

70年代，人们在研究华南花岗岩类地球化学中明显看出，不同构造或同期不同构造阶段的岩石和地球化学特征是不同的。

80年代，许多单位都从不同的角度开展了构造地球化学方面的研究工作。概括起来有以下几方面的内容：(1)论述构造、岩浆、沉积、变质以及成岩成矿等地壳运动的主要表现形式；阐明在地壳运动中上述各种地质作用均受统一的构造应力场控制；讨论在成岩成矿过程中构造运动起主导作用；(2)强调构造不仅在控矿中主要是提供各种流体运移的通道和成矿物质沉淀富集的场所，而且导致了元素的重分配、组合和调整，包括成矿物质在构造活动过程中的活化、迁移、分散和富集；(3)从研究构造控岩控矿阶段发展到研究构造控岩、控矿与构造成岩、成矿并重，即动力成岩成矿；(4)不仅认识构造控岩、控矿及构造成岩、成矿的客观规律，而且充分利用各种先进技术手段进行探测和模拟实验，为阐明构造作用与地球化学作用及成岩成矿作用之间的关系提供充足的理论和实验依据。

近年来，国外在构造地球化学方面的研究也有报道。如R. B. Parker (1974) 在研究褶皱变粒岩相岩石中主元素分布时发现，在构造枢纽比较富集Ti、Fe、Mn和Mg，而翼部则比较富集Al、K和Na。

不难看出，随着工作的不断深入，构造地球化学将会得到更多的重视，获得迅速的

发展。

构造地球化学的发展方向，应侧重以下内容：

1. 充分利用各种学科的原理、方法，并使之有机地、紧密地结合起来，推动构造地球化学发展，以获得完整的、准确的实际资料；

2. 充分运用各种先进分析测试设备和手段，以便获得准确可靠的构造地球化学信息，并建立构造控矿、构造成岩成矿及矿床成因等模式；

3. 开展高温高压模拟实验，研究构造演化与元素演化的关系，逐步建立成矿的构造地球化学标志，为矿床成因、成矿理论及成矿预测提供可靠信息及实验依据；

4. 开展构造矿物、元素、同位素温压地球化学研究，以便查明构造与成矿时代、发展演化、构造与成矿活动的期次，以及温度压力变化规律；

5. 深入开展构造应力矿物学的研究，探索构造作用下同步发生的矿物内部结构、相变与地质条件成矿作用的相关性；

6. 研究构造地球化学的编图方法，开展构造地球化学的编图工作，以促进成矿预测及隐伏矿体预测工作从定性或半定量向定量阶段发展，更好地为找矿、勘探、成矿预测服务。

二. 断裂构造地球化学

由于断裂构造与成矿关系密切，所以断裂构造地球化学的研究，受到地质工作者的特别重视，这种研究对找矿勘探和盲矿体的预测有着直接的实际意义。

在断裂构造作用进行中，化学作用比较复杂，有塑性流动、压力溶解、重结晶、元素的动力分异作用、断裂变质作用、水解和脱水作用、氧化和还原作用、核反应等。所以对断裂带岩石（构造岩），应该进行矿物（化）学、岩石（化）学、微量元素和同位素的研究。

K.H. Brodie (1981) 对角闪岩相、变辉长岩内剪切带矿物学的研究表明：角闪石和斜长石的组份是随着变形而变化的。岩石化学分析指出，剪切带接近于一个等化学体系。在剪切带中，角闪石递进把从一种原来的非角闪石，变化为一种铁非角闪石一角闪石，而且增加了 Ca 、 Ti 和 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}$ 。当斜长石变为较多的钙长石时，变化是从拉长石变为倍长石的。

断裂作用显示出断裂两壁岩石的物质重分配。其中特别有意义的是当岩层或岩体发生断裂运动时，岩壁中一些与成矿有关的微量元素，沿着断裂分散，迁移到某些有利部位，便在其处的断层壁上或断裂产物（断层泥、断层角砾岩）中相对富集，有时可因此形成矿体，或把原有矿床改造形成新的矿床。

同一断层的不同部位，应力分布情况不同。应力分布的差别可以引起断层两壁岩石中的物质成分，或沿断层侵入的含矿物质组分，发生分异，有用组分向一定的有利部位富集，因而可形成富矿体。研究断层中这些应力差异部位的分布，可以作为预测隐伏矿体的依据。