

图3 富锗赤铁矿(上图)与贫锗赤铁矿(下图)X光衍射曲线对比

## 结 语

1. 该矿床属赤铁矿型锗矿新类型, 锗在铁矿石中都达到独立开采的工业品位。铅、钨均可考虑综合回收。

2. 矿石中的赤铁矿是锗元素的主要载负体。上述各种实验表明, 锗在赤铁矿中是呈类质同象存在的。

3. 矿石中锗含量高, 铁含量一定高, 反之, 铁含量高, 锗含量不一定高。这是由于

锗只选择富集在某种特定的晶体化学与地球化学作用过程形成的赤铁矿所造成的。因此, 铁含量不能作为圈定锗矿体的主要依据。

4. 根据锗的分布与存在状态特点, 在安排选别流程时, 主要应考虑如何有效地富集赤铁矿, 以达到富集锗的目的。欲使铁精矿中锗的品位提高, 将富锗与贫锗赤铁矿有效地选别是十分重要的。根据两类赤铁矿磁性的差异, 将二者选别分离是可能的。



数学地质

## 地质统计学在研究矿体地质中的应用

陈伯茂

地质统计学是数学地质中关于研究区域化变量空间相关的一个新兴的分支。我国从1974年起陆续翻译介绍过这方面的资料, 1977年美国采矿地质学家H.M. Parker来我国进行过有关地质统计学专题的技术座谈。从1978年开始了这一方法的研究, 并且在几个矿床上应用点克立格法试算储量。随着我国地质勘探事业的发展, 国外先进技术的引进以及与国外合办矿山企业的增多, 采用地

质统计学方法估算储量将愈来愈多, 也将会促使地质统计学在我国的发展。我们试图用“地质统计学”方法对某铜矿的矿体地质进行研究。

### 四川某铜矿床地质勘探工作

该矿床产于前震旦纪会理群的一套酸碱性浅成—超浅成变质岩(黑云片岩、二云片岩及钠长岩)中。矿床由50个矿体组成, 其

厚度大于3米者有24个,其中除1—5号矿体规模大,延伸长外,其余矿体延长很少超过100米。矿体一般呈重叠—叠瓦状产出,形态多呈似层状、透镜状,膨胀、复合和分叉现象明显,其产状与围岩基本一致。倾角一般在20~35°,个别地段较陡。矿石类型有浸染状、条带状、条纹状。主要金属矿物有黄铜矿、黄铁矿,磁铁矿等,除主金属铜外,还伴生有铝、钴、硫、铁等有益组分可供综合利用。属于大型以铜为主的多金属矿床。

该矿床早在1958年就着手初勘,在1965~71年和1975~76年又进行了补勘和详勘。1958年以来一直在小规模露天开采。该矿床属第二勘探类型,采用以钻探为主,辅以坑道检验的勘探方法,网度采用120×100~80米探求C<sub>1</sub>级储量,60×50~40米探求B级储量。地质勘探钻孔219个,基建钻孔21个,绝大多数皆为直孔。1978年经成都地质学院用数理统计方法和403队用不同网度交叉抽孔放稀法分别进行对比验证,其结果都说明所采用的勘探网度尚能合理地控制矿体的变化。尽管如此,我们试用“地质统计学”方法,从另一角度来探讨一下该矿床的勘探网度的问题。

## 地质统计学的应用

我们知道,地质统计学是以矿化空间结构(空间相关)为基础,以区域化变量为核心,以变异函数为基本工具的一种数学地质的新理论和新方法。在传统的统计学中,变量的离散程度是用方差来表示的,而方差只能反映变量的绝对离散程度,不能反映变量的变化性质。然而区域化变量(或称有限空间变量)却以变异函数和变异曲线来表示其在空间的变化程度,而且它还能反映区域化变量的变化性质。这是地质统计学的优点之一。

所谓变异函数就是区域化变量增量平方的期望值。它定义为  $2\gamma(h) = E\{Z(x) - Z(x+h)\}^2$ ,实质上,它是一个矢量函数,有距离和方向。它可以表征矿化的连续程度,反映区域化变量的定性特征。但是实际利用有限的有用数据进行计算的公式却是实验变异函数,即

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_i [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2$$

式中  $N(h)$  是距离  $h$  等于取样间隔的倍数时所获得的样品对  $[Z(x_i) - Z(x_i+h)]$  的数目。

### (一) 原始数据的处理

计算变异函数要求样品长度相等,钻孔分布一定要规格。南非、西方国家勘探工作几乎都是这样做的,这与地质统计学的发展有密切关系。但是,这些条件在我国实际地质工作中是难以遇到的,为了能充分利用地质数据的信息,必须对原始地质数据进行变换与处理。

1. 样长的规格化及钻孔垂直方向的变异曲线 实际钻孔的岩心样长是不相等的。为了使其能进行钻孔垂直方向变异函数的运算,我们将不等长的岩心样规格化,选择了地质勘探、基建勘探代表性钻孔105个,原始铜品位样品数据2766个(包括未达到边界品位样品),用其平均长度2米作为标准长度,然后将原始样品数据看作点样进行规格化,获得规格化后数据2176个。求得样品方差  $\sigma^2 = 0.265 (\text{Cu}) (\%)^2$ 。经计算得各间距的变异函数值见表1,作变异曲线图1。

钻孔垂直方向变异函数统计表 表1

间距(米)	样对数	函数值
2	2002	0.151
4	1907	0.175
6	1816	0.222
8	1740	0.225
10	1634	0.242
12	1502	0.259
14	1444	0.242
18	1264	0.263
30	918	0.261
50	469	0.269

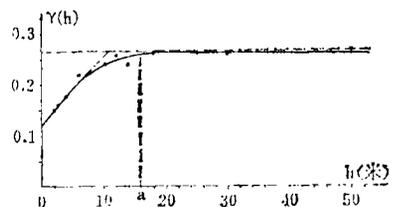


图1 钻孔垂直方向的变异曲线  
 $K(0) = \sigma^2 = 0.265, a = 16 \text{米}, C_0 = 0.12$

2. 随机分层 铜矿床是一个倾角为20~35°倾斜的三度体,要计算三维的变异函数就较为复杂。为了使计算工作简化,提高抽样研究的有效率,我们采取了随机分层的办法。加拿大学者戴维德(David, 1976年)认为,一个矿体可以按分层计算,在计算每个分层时,可以不考虑它上、下界面之外的数据资料,而只限于这个分层内的信息与数据,将它化为二度体,而每个分层中各样品平均品位可看成是一个点上的样品值。将分层简化为一个平面,便于计算。关键在于分层的高度,它应该考虑垂直方向上的变程。有人利用转轴的办法,即将勘探线转到与X轴平行,再把矿体顶板转到水平作为二度体处理。但由于矿体倾角有变化,经转轴后矿体实际上也并非水平,而且伴之而来的是原来直孔的钻孔位置也产生了较大改变。因而这不是一种最优办法。

我们将整个矿床,用垂直方向的变程16米进行分层处理,共划分为35层。然后分别把各层的每个钻孔样品值用其样长加权求得该层钻孔的平均品位(也可以把它看作为该孔的点品位),共获得分层钻孔平均品位数据671个。

3. 钻孔数据的规格化 众所周知,地质勘探钻孔即使按规则网格布置,由于钻孔弯曲的关系,见矿点往往常有偏移。该区钻孔虽大多是直孔,但并不是按严格网格布置的,其分布仍不规则。为了便于计算,于是采用与随机采样点拟合的网格法,即用12×12米(适用基建钻孔)和60×60米(适用地质勘探钻孔)网格与见矿孔拟合将原始数据规格化。

### (二) 变异函数值的计算

受条件限制,我们用日本夏普公司制造的ELSI MATE牌EL-5002型电子计算器,计算变异函数值(见计算程序及储存程序)。实践证明,用小型电子计算器完全可以进行变异函数计算,当然计算工作量仍然是大的。处理16022个数据对,二个人在半个月内可以完成。

### (三) 变异函数和变异曲线

在35层矿层内,共671个钻孔平均品位数据,求得了平行勘探线方向和垂直勘探线方向的变异函数值(表2,表3)。

变异曲线图是根据变异函数值用通常的

### 计算程序

运 算	显 示	备 注
COMP-LRN	0	
[X]	[ ]	
STO-1	0	
[X]	[ ]	
STO-2	0	
RCL-1	0	
[-]	0	
RCL-2	0	
[=]	0	
X <sup>2</sup>	0	
LRN-COMP	0	
[COMP]	[ ]	
0.31	0.31	以0.31样品值为例
[COMP]	[ ]	
0.51	0.51	
[COMP]	0.04	某样对增量的平方值

### 储存程序

运 算	显 示	备 注
"STAT"	0	
0.04	0.04	某样对增量的平方值
[M+]	1	
0.05	0.05	另一样对增量的平均值
[M+]	2	
... ..	... ..	
[F] [X]	0.045	
[F] 2	0.0225	某样对变异函数值

平行勘探线方向(8°40')变异函数值 表2

间距(米)	样对数	变异函数值
12	2	0.056
24	17	0.136
36	2	0.081
48	12	0.158
60	225	0.245
120	156	0.22
180	109	0.20
240	71	0.17
300	53	0.195
360	29	0.10
420	8	0.13
480	3	0.10
540	3	0.02
600	1	0.34

垂直勘探线方向(98°40')变异函数值 表3

间 距 (米)	样 对 数	变异函数值
12	2	0.054
24	3	0.038
36	13	0.072
48	2	0.197
60	160	0.32
120	218	0.37
180	93	0.47
240	144	0.44
300	64	0.31
360	104	0.23
420	46	0.14
480	70	0.24
540	31	0.47
600	46	0.28

平行勘探线方向的样品方差为0.20 (%)<sup>2</sup>

垂直勘探线方向的样品方差为0.29 (%)<sup>2</sup>

作图方法,即以变异函数值 $\gamma(h)$ 为Y轴,以距离 $h$ 为X轴作出的曲线。它形象地刻画了变异函数变化的性质(图2,3)。然而,这种曲线受误差的影响往往是锯齿状的,故称之为实验变异曲线。我们采用一定的数学方法和经验将它拟合成一条能表达矿化范围空间相关的并能用数学式表示的圆滑曲线。拟合的好坏直接影响变异曲线诸参数的选择。

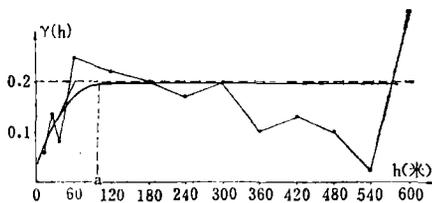


图2 平行勘探线方向(8°40')变异曲线

$$\sigma^2 = 0.20, a = 100, C_0 = 0.035$$

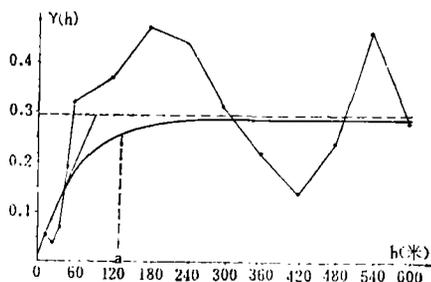


图3 垂直勘探线方向(98°40')变异曲线

$$\sigma^2 = 0.29, a = 128, C_0 = 0.01$$

我们认为:

1.从各变异曲线图可以看出,拟合好坏与原变异函数值的可靠性有直接关系。钻孔垂直方向上变异函数实验点起伏小,拟合方法简单,拟合程度高,这与各间距的样对数多(在1000~2000对左右),变异函数值误差小有关。而平行勘探线和垂直勘探线方向的变异函数实验点起伏大,拟合程度低,这与其前端实验点样对数少,变异函数值误差大有密切关系。因此,有人提出一般样对数在30~50对以上的要求。

2.变异函数是区域化变量空间相关的函数,一般来说,它是反映变量空间的相关程度,变量间距近,相关程度大;相距远,则相关程度小以至彼此独立。因此,根据上述性质,在拟合时变异曲线前端变程段的实验点具有重要的意义,而后端稳定段实验点可用样品方差的附加信息。

3.变程段实验点的拟合方法根据实验点分布特点不同而有所区别:

(1)凭经验直观拟合。比如钻孔垂直方向变异曲线,实验点彼此起伏小,基本显示了一条圆滑曲线,这种情况就可直接拟合。国外也有用这种简便方法,而且效果往往很好,这与实际经验有关,他们往往称之为地质统计学家的“艺术”所在。

(2)用最小二乘法直线拟合。因变程段局部地段可以近似看作为直线,用最小二乘法拟合效果也是好的,例如垂直勘探线方向的变异曲线。当然根据实验点分布特征,也可采用最小二乘法的曲线拟合,当各点变异函数样对数不等时,也可用样对数加权之。至于拟合程度如何,有人提出用试错法(trial and error)即检查拟合误差,反复计算,直到误差最小为止。

(3)滑动平均法。将原始数据经过整理达到平滑,压抑随机误差。如平行勘探线方向变异曲线拟合就采用这种方法。

#### (四)确定变异曲线的参数

所谓参数是指能描绘变异曲线的主要特征的量值。知道了这些参数,也就确定了变异函数,就能研究矿体地质的特征。这些参数主要有块金值、变程、基台、拱高等。

1.块金效应值 $C_0$ 。该词来自于南非金矿的块金结构,说明在相同位置取得的样品,其分析结果是不同的,即距离 $h$ 等于0时变异

函数  $\gamma(0)$  值, 它反映  $h$  极小时样品品位的离散程度。块金值  $C_0$  由变异曲线自然延长与  $y$  轴相交所得的截距。

2. 变程  $a$  指区域化变量彼此相关的范围, 相当于矿体的平均大小, 相隔  $a$  值的变量彼此独立。一般以变程段拟合的变异曲线的切线与基台值相交点  $2a/3$  值取得。如垂直勘探线方向变异曲线变程段切线与基台值相交的距离为 85.4 米, 即变程  $a = 85.4 \times 3/2 = 128$  (米)。

3. 基台值  $C_1$  指  $h > a$  时,  $\gamma(h)$  的极限值, 即样品品位的方差, 根据不同方向的样品品位计算所得。

4. 拱高  $C$  指品位方差与块金值之差  $C = C_1 - C_0$  为一常数。它是  $h \rightarrow 0$  时, 品位值离散程度的测度。

各方向所得参数见表 4。

各方向变异曲线参数统计表 表 4

变异曲线	基台 $C_1$	块金值 $C_0$	变程 $a$ (米)	拱高 $C$
钻孔垂直方向	0.265	0.12	16	0.135
平行勘探线方向	0.20	0.035	100	0.165
垂直勘探线方向	0.29	0.01	128	0.28

## 结论与存在问题

从表 4 各参数可以得出如下结论:

(一) 钻孔垂直方向、平行勘探线方向及垂直勘探线方向的块金值是不等的。以钻孔垂直方向最大 (0.12), 垂直勘探线方向最小 (0.01)。虽然块金效应产生的原因很多, 有矿体矿化存在小规模跃迁, 也有取样、分析误差引起的, 后者称之为“人为块金效应”, 可以通过一些办法消除。而它们块金值彼此相差在 10~30 倍之大, 也足以说明矿体品位本身是变化的, 不连续的, 钻孔垂直方向即厚度方向变化最大, 也最不连续。这与它们的变程变化相一致, 钻孔垂直方向变程最小 (16 米) 也说明厚度方向品位的变化最大, 平行勘探线方向次之, 垂直勘探线方向最小。这种情况与矿体厚度方向变化最大, 走向变小, 小于倾斜方向变化的通常地质现象是吻合的。

(二) 变异曲线的变程是由拟合直线或曲线的切线与基台值相交求得的, 因此变程的大小与直线或切线的斜率有直接关系。如

平行勘探线方向斜率 0.006, 变程 100 米; 垂直勘探线方向斜率 0.003, 变程 128 米; 钻孔垂直方向斜率 0.014, 变程 16 米。变程大小与斜率成反比, 因而斜率也能反映矿体变化的速度。

(三) 平行勘探线方向变程 100 米, 垂直勘探线方向变程 128 米, 因此可以采用以 128 米  $\times$  100 米为边的长方形网格布置钻孔。加拿大学者伯赖斯 (R. A. Blais) 和卡里尔 (P. A. Karlier) 认为, 所谓最佳勘探网格就是在钻孔数相同的情况下使品位估计量误差为最小的一种钻孔排列方式。换言之, 按变程划分矿床网格, 在网格内至少必须有一个钻孔。因为变程内相邻钻孔彼此相关, 它们的关系可以通过相关函数  $K(h)$ , 方差  $K(0)$  和变异函数  $\gamma(h)$  之间的关系式, 即  $\gamma(h) = K(0) - K(h)$  来表示。  $K(0)$  是定值, 已知  $\gamma(h)$ , 也就知道  $K(h)$ 。若超过变程的范围,  $K(h) = 0$ 。所以在变程内可用一个钻孔探矿。但这个钻孔所控制的矿块的样品方差应该小于矿床的样品方差。根据克立格公式:

$$\sigma^2(v/V) = \sigma^2(0/v) - \sigma^2(0/V)$$

$$\sigma^2(v/V) - \text{矿床 } V \text{ 内 } v \text{ 矿块品位方差}$$

$$\sigma^2(0/V) - \text{矿床 } V \text{ 内的样品方差}$$

$$\sigma^2(0/v) - \text{矿块 } v \text{ 内的样品方差}$$

矿块内样品方差必小于矿床样品方差。实际上, 某些矿块由于品位变化程度大, 其样品方差可能会超过矿床的样品方差。在这种情况下, 矿块内一个钻孔控制是不够的, 必须加密钻孔, 以增加抽样数而使方差减小。至于每个矿块的方差可通过克立格方法分别计算, 然后可以统计超差的矿块数目。

至于每个矿块所控制的储量等级如何? 我们知道, 储量等级划分的主要依据是误差大小。西方国家计算储量是按变程大小划分相等的矿块, 由于它们的体积是相等的, 对于同类型的矿体体重可以看成相近的, 因此矿块储量的不等关键在于其平均品位。只要对于每个矿块分别作出品位频率分布曲线和求出该矿块的方差, 也就知道大于边界品位或工业品位的品位区间的概率值, 因而也就确定该矿块储量的可靠程度即储量级别。

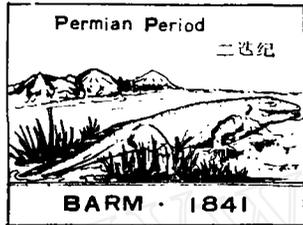
遗憾的是后一步工作, 受条件限制未如愿进行。但从现在用地质统计学求得的长方

形网格128×100米与地质队勘探所求C<sub>1</sub>级储量的网度120×100~80米是比较接近的。

(四)综上所述,地质统计学的方法对研究矿体地质特征,确定勘探网形式及其大小是有效的。当然在应用上还存在许多具体问题,不过只要我们继续实践,不断总结经

验,这些问题也会逐步得到完善解决的。

我们在工作过程中得到四川地质局403地质队的大力支持,吕凯和杨光锋同志参加了具体计算,另外成都地质学院王柏钧同志给予很大的帮助,特致谢意。



二迭纪(Permian)的名字来自俄罗斯北部贝尔姆省的名称,因为那里的二迭纪地层特别发育。其两分的由来是因为德国这个纪的地层明显地分为上下两部分而得名。世界二迭系(1841年莫迪逊确立了二迭系。1900年巴黎国际地质会议尚未承认二迭系,现在一般都承认了)标准剖面最初建立在西乌拉尔贝尔姆(狭义的萨克马尔组(Sakmarian)),后在美国得克萨斯又建立一条剖面。这两条标准剖面的上部均为含盐建造,化石稀少,远没有我国二迭系剖面完整、化石丰富。因此,真正标准的剖面还在我国。最早1912年德国人李希霍芬创立了南京栖霞山早二迭世的“栖霞灰岩”。我国刘季辰等于1924年、李四光等于1930年分别确立了江苏龙潭镇晚二迭世的“龙潭系”和“龙潭石灰岩”,后又有葛利普于1931年、哈安姆于1932年分别确立了浙江长兴县晚二迭世的“长兴石灰岩”和“长兴煤系”,盛金章的《中国二迭系》。这些前人的研究为我国二迭纪地层的建立奠定了基础。以后不少地质工作者先后作了系统工作,建立了我国二迭纪比较完整的地层系统。

二迭纪是古生代最后一个纪,距今约2.25~2.8亿年(下限年龄苏联定为285±5百万年,英国Q.J.G.S.年表定为280百万年,发现有资料在280~285±5百万年是较有依据的)。那个时期,由于地壳运动(华力西运动)的影响,特别是末期除西南少数地区外,海水已从我国大部分地区撤离,出现了前所未有的辽阔大陆。由于自然环境的改变,生物界也随之发生了显著的变化。无脊椎动物中的三叶虫、珊瑚、腕足以及瓣类相继

衰亡,软体动物中的瓣腮类和菊石类则逐渐兴盛,脊椎动物中的两栖类进一步发展,到二迭纪末,出现了真正的爬行动物。植物群在早期石松类衰退,种子蕨愈加兴盛,晚期华夏植物群最发育,新兴的大羽羊齿、瓣轮叶等极其茂盛,高等裸子植物松柏、苏铁、银杏类等开始兴起。早二迭世的瓣类、床板珊瑚、类梭复菊石;晚二迭世腕足类的蕉叶贝、欧姆贝、长身贝、外胃菊石、大羽羊齿等是确定时代的重要化石。

我国二迭系,根据沉积岩相和古生物群特征,大致可以天山、祁连山、秦岭、大别山一线为界,分为南北两部分。南方以海相沉积为主,并存在明显的相变。层序非常清楚,化石丰富,是研究世界二迭系不可缺少的重要地区之一。其下统下部“栖霞组”以深灰色燧石灰岩为主,夹硅质岩,并富产瓣类(三个化石带: *Misellina claudiae*, *Nankinella inflata parafusulina multiseptata*)、珊瑚化石(二个带: *Wentzellophyllum Volzi*, *Hayasakaia elegantula*),上部“茅口组”以含燧石结核灰岩、白云质灰岩为主,盛产珊瑚、瓣类、腕足、菊石类化石,上统下部“龙潭组”(“吴家坪组”)是南方重要产煤地层,以碎屑岩为主,富产大羽羊齿等植物化石,上部“长兴组”(“大隆组”)为燧石灰岩或硅质页岩,富产瓣类以 *Palaeofusulla* 为代表,腕足类以 *Oldhamina* 为代表,或以混生动物群中腕足动物 *Peltichia Zigzag-Paryphella Sulcatifera* 组合带,头足类菊石群化石(以 *Pseudotiroilites*, *Pleuronodoceras Qiangjiangoceras* 为代表)。关于长兴(大隆)组的层位问题,目前国际上存在两种意见,苏联力图取消长兴阶,美国Furnish, W.M.等人以长兴组建立了长兴阶,并作为晚二迭世一个统一的国际性地层单位,为世界二迭系,也是我国古生界最高的一个层位。北方二迭系以含煤著称,几乎全为陆相,偶夹海相沉积。其下统下部“山西组”为含煤碎屑

岩,上部“下石盒子组”主要为砂砾岩、砂岩、页岩夹煤层;上统下部“上石盒子组”为砂、页岩夹煤层,上部“石千峰组”为紫红色砂泥质岩夹灰岩结核及瘤状灰岩。我国二迭系与国际标准分层可对比为:下统下部相当于“萨克马尔阶”、“阿丁斯克阶”(Artinskian/Sakmarian),上部相当于“空谷阶”(Kungurian),上统下部和上部分别相当于“卡赞阶”(Kazanian)和“塔塔尔阶”(Tatarian)。关于二迭系的划分,我国坚持两分的观点,一贯主张其下界定在“栖霞组”,底界放在假希斯礁(*Pseudoschsellina*)化石之上,并以 *Misellina*(米斯礁)的出现作为二迭系的开始;其上界则以出现 *Ophiceras*(蛇菊石)作为三迭系的开始。

二迭系国内外始终是二分。国内最近也有人想把石炭系上统上部往上拉,单独列一个统,使二迭系三分,这种意见没有得到第二届全国地层会议的承认。

晚古生代华力西期岩浆活动是我国地史上比较强烈的一次,特别是二迭纪末期的运动最为强烈,相当本纪的侵入岩活动属华力西晚期(同位素年龄:2.3~2.6亿年),以花岗岩、白岗质花岗岩为主,广泛分布于东北部、大小兴安岭、内蒙北部、天山、西昆仑山、祁连山、滇西、西藏台及湾等地;在张广才岭、祁连山、滇西和川滇边区还有基性、超基性岩。以上地区晚古生代地层均发生不同程度的区域变质,部分受混合岩化。

二迭纪地层似是世界各国重要成煤期之一。沉积矿产主要有:煤、铁、铜、锰、磷、黄铁矿、盐类、油页岩、石油、铝土矿、耐火粘土等。内生矿产主要有:铁(伴生稀有元素)、钨、锡、钼、铜、铅锌、铍、铬、镍、钒、钽铌磁铁矿、金云母、水晶、石膏等。(莫杰供稿)

