

攀西地区白马和红格层状岩体 分异特征的数学地质论证

郭履和 杨本锦 张冬梅 曾 晴

(四川省地质局攀西地质大队)

鉴于人们对四川省攀西地区钒钛磁铁矿的成矿母岩——基性—超基性岩的成因和成矿机理争论较大,本文拟在前人工作的基础上^①试用数学地质方法^[5,6],对影响岩体成矿甚为关键的岩体分异特征进行探索,不妥之处,欢迎批评指正。

一、主要地质特征和研究现状

白马、红格钒钛磁铁矿,受安宁河断裂和昔格达断裂的控制,呈南北向展布。白马含矿岩体属基性岩型(辉长岩型),红格含矿岩体属基性超基性岩型(辉长岩-辉石岩-橄辉岩型)。两者虽有各自的独特之处,但因它们的控矿及成矿地质条件基本相同,故而有显著的共同特征^{②③}。主要有:1.两者均分布在南北向断裂带内的锯齿状剪切拉张地段;2.两岩体均侵位于震旦系灯影灰岩之中;3.据同位素年龄测定结果,白马岩体为3.5亿年,红格岩体为3.4亿年,两者均属海西早期;4.两岩体均属于富铁、钛,钙偏高而贫硅的铁质基性超基性岩,镁铁比值在0.5—2.7之间;5.两岩体结晶分异良好,有明显的韵律层状构造,含矿性都很好;6.尽管两含矿岩体的岩石组合不同,但造岩矿物组合基本相同。主要有基性斜长石、含钛普通辉石和橄榄石三种。三者互为消长关系,一般是基性斜长石从上至下逐渐减少,而含钛普通辉石和橄榄石则逐渐增加,岩石的基性度和矿化程度亦逐渐增加;7.矿石以海绵陨铁结构和各种浸染构造为主,自形一半自形粒状镶嵌结构和条带状、块状构造次之。

目前研究较少且争论较大的问题是,攀西地区含钒钛磁铁矿层状基性超基性岩的成岩成矿机理。对此说法较多,主要观点有:①认为层状基性超基性岩体及矿体的形成是岩浆结晶分异的结果;②认为矿体是晚期矿浆贯入到已固结成岩的基性超基性岩体中而成,即所谓贯入观点。此外,也有人提出:“矿石层属于晚期富铁钛矿浆的贯入、交代产物”,而层状岩系的形成“火成堆积作用不是主要的成岩机制,岩系的形成是岩浆由岩浆囊的四周逐步向中心冷却固结而成^④”。我们仅从数学地质角度,为从事成岩成矿专门研究的同志们提供一点佐

① 秦震、周信国、芦记仁、唐兴信、李德慧、杨光荣等在本区作了大量地质、勘探和研究工作。

② 周信国、元绍枚、唐兴信等1981年“攀枝花—西昌地区钒钛磁铁矿成矿规律与预测研究报告”(审查稿)。

③ 芦记仁、施泽民等1980年“攀枝花—西昌地区钒钛磁铁矿共生矿物物质成分研究报告”。

④ 王正允1982年“四川攀枝花含钒钛磁铁矿层状辉长岩体的岩石化学特征及其成因初探”。

证。

二、分异特征论证

我们设想：若岩体及矿体的形成系岩浆结晶分异——火成堆积成因，则其化学成分、造岩矿物以及岩体的形成温度和氧逸度等从下而上应有规律性变化。重力起作用时应轻元素及其矿物在上，重元素及其矿物在下；若为晚期矿浆后期贯入成因或其它原因，则岩体从下到上不具备这种规律性变化。为此，我们选择白马和辛阶两岩体按原子量大小顺序排列进行元素的统计分析；根据岩石化学资料计算白马岩体从下至上的形成温度和氧逸度；选择红格岩体第Ⅲ韵律层进行距离回归分析，以观察岩体化学成分从上到下是否具规律性变化。

(一) 元素和矿物赋存空间分布特征的统计分析

1. 方法选择：

为了验证成岩过程中重力分异作用，考察有关元素是否受重力制约，我们以相关分析，研究岩体柱状图上几种元素的氧化物的峰值出现位置和顺序与该元素原子量大小之间的关系，把峰值出现的顺序近似地看作元素的堆积顺序。由于白马基性岩体岩石化学资料较全，相带、韵律层较明显（自下而上分为三个大韵律层，包括四个岩相带，钒钛磁铁矿主要赋存在第二韵律的下部，见图1），以此为例进行分析。

2. 数据处理及结果

由于直接用元素的原始观测值来探讨这种关系容易受个别特高品位和某些偶然因素的影响，为此，我们用5点滑动平均值来代替原始观测值，再将滑动平均值正规化处理后作成变化曲线图(图1)，以此来确定元素在柱状剖面上出露的峰值位置。

为计算方便，以元素在柱状图上从下到上的峰值位置到岩体底板的距离为横座标（如Ni的峰值位置有两处，分别为A韵律层底部和Ba韵律层底部，它们距底板的距离分别是62米和269米。Cr的峰值只有一处，在A韵律层底部，距底板的距离为62米），以元素的原子量大小为纵座标作散点图（图2），进行相关及回归分析。从图2各点的分布趋势看，两者呈曲线相关，故决定采用广义幂函数转换公式拟合

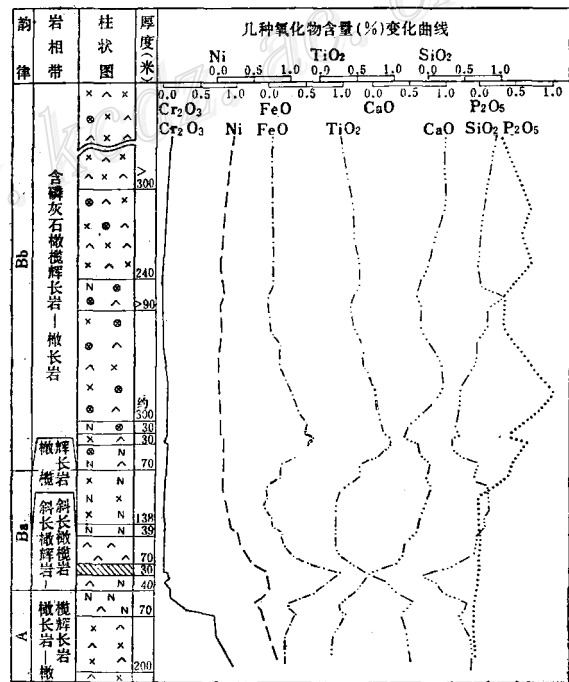


图1 白马岩体岩相带及几种氧化物含量变化曲线①
Fig. 1. Diagram illustrating petrofacies division and variations in several oxides of Baima intrusive body.

① 此图系根据原820队资料，编制时有所删减；各变化曲线已经过滑动平均正规化处理，只反映变化趋势。

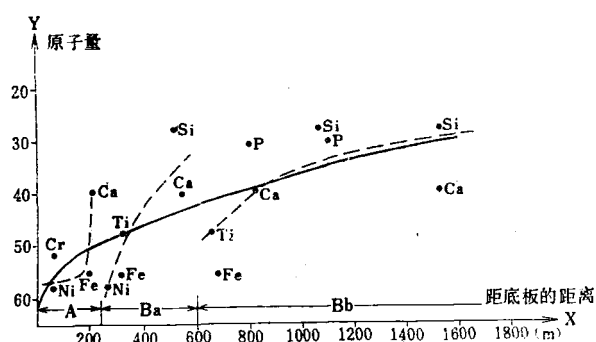


图 2 白马岩体元素堆积顺序与原子量的相关曲线图

Fig. 2. Diagram showing relationship of atomic weights to accumulation sequence of elements in Baima intrusive body.

曲线。其公式为

$$y = a + b \left(\frac{x^\lambda - 1}{\lambda} \right)$$

式中 y 为原子量； x 为元素峰值位置距岩体底板的距离； a 、 b 为方程系数； λ 为幂转换系数，此系数由试验确定，选用相关系数最大时的值。

计算分两种情况进行。一是计算整个岩体的元素峰值位置与原子量大小的相关情况，了解总体变化规律；二是分韵律层进行

计算，了解每个韵律层的变化情况。其结果见表 1、图 2。

表 1 峰值位置与原子量相关方程表

韵律层	点数	方 程 系 数			相关系数	临界值 $\alpha = 0.10$
		a	b	λ		
Bb	8	127872.06	-166207.69	-1.3	-0.7062	0.6215
Ba	5	22273.63	-24487.67	-1.1	-0.8873	0.8054
A	4	56.0918	-2.7031×10^{-47}	21	-0.9320	0.9000
Bb + Ba + A	17	61.8835	-0.4116	0.5	-0.6989	0.4124

表 1 所列相关系数均大于检验临界值，说明整个岩体及各韵律层内元素的堆积顺序与原子量大小密切相关。从图 2 看出各岩体从下到上有明显的总体变化规律。就是重元素及其矿物堆积在下，轻元素及其矿物堆积在上。元素及其矿物的堆积顺序为 Ni、Cr、Fe、Ti、Ca、P、Si。表现在成矿作用序列上则是：岩体底部为富含 Ni、Cr（辛阶、红格岩体还含 Pt 族元素^[1]）的钒钛磁铁矿层，常具嵌晶结构（或包含结构），其元素组合为 Ni、Cr、Fe、Ti、V；岩体中、下部是以钛磁铁矿为主的钒钛磁铁矿主矿层，具典型的海绵陨铁结构，其元素组合为 Fe、Ti、V；岩体中、上部是以钛铁矿为主富含磷灰石的钒钛磁铁矿层，具填隙状结构，其元素组合为 Fe、Ti、V、P；再往上则为含磷灰石辉长岩（磁铁矿含量很少，不具工业意义）。与此相对应的成岩作用序列是，斜长橄榄岩、斜长橄辉岩→橄长岩、橄辉长岩→富含磷灰石的含橄辉长岩→含磷灰石辉长岩。上述这种规律性变化，在每个韵律层内亦表现得很明显。造成这种有规律的空间分布的原因是原子的重量大小。在地球重力场内元素的迁移，不论它以什么方式进行，都受重力法所支配，即较轻的极力向上移动、较重的则极力向下移动^[2]。

上述规律在其它岩体是否存在呢？我们选择层状构造、分异程度、矿化程度均较白马差的辛阶和分异不好、层状构造不明显、矿化不好的坝头上两岩体，对 Cu、Co、Ni、Fe、Cr、

V、Ti、P等8个元素作了同样的统计分析,结果辛阶的相关方程为

$$y = 58.5297 - 8.0735 \times 10^{-21} \left(\frac{x^8 - 1}{8} \right)$$

(式中各代号意义与白马相同)

相关系数 $r = -0.5846$, 大于检验临界值 ($\alpha = 0.10$ 时 $r_0 = 0.5214$), 得到了与白马岩体相同的结论。但相关系数较白马小, 说明重力分异作用较白马差, 矿化也差; 而坝头上的相关系数小于检验临界值, 说明分异不好、层状构造不明显的坝头上重力作用亦不明显, 矿化也就不好。

(二) 岩石的形成温度 (T) 和氧逸度 (f_{O_2}) 的统计分析

岩石的形成温度和氧逸度, 反映岩石形成过程和环境的某些物理化学条件。不同岩性(中性、酸性、基性)、不同岩相(深成相、浅成相、喷出相)的岩浆岩其形成温度和氧逸度不同。故根据岩石的形成温度和氧逸度的变化情况可以推断岩浆形成演化过程中某些物化条件和生成环境。

沿一个剖面系统测定岩石的形成温度和氧逸度, 耗时费资较多, 难于实现。但因白马钒钛磁铁矿的成矿母岩为橄榄玄武岩浆系列, 从下至上均有橄榄石矿物出现, 因此可以利用玄武岩浆中MgO和FeO的分子百分数与橄榄石的铁橄榄石 (Fa) 含量以及结晶温度 (T) 的关系图 (图3) 和铁橄榄石 (Fa) 含量、结晶温度 (T) 与氧逸度 (f_{O_2}) 的关系曲线图 (图4) 等两个图象来间接估算氧逸度和橄榄石的结晶温度^①。

我们把上述方法求得的氧逸度和橄榄石的结晶温度暂且视为岩体某个位置上的氧逸度和

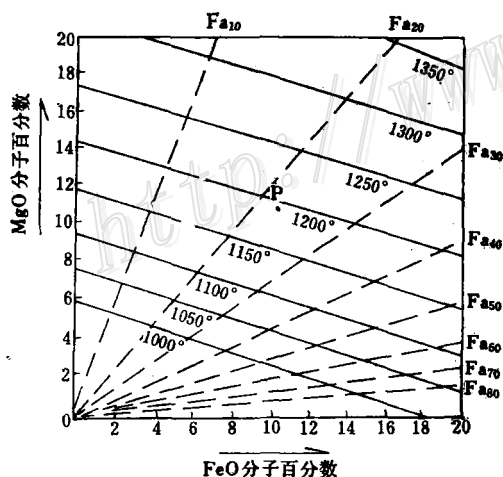


图3 玄武岩浆中镁铁氧化物分子百分数与橄榄石 (Fa) 及结晶温度 (T) 关系图

Fig. 3. Diagram showing relationship of molecule percentage of manganese-iron oxides to olivine (Fa) and crystallization temperature in basaltic magma.

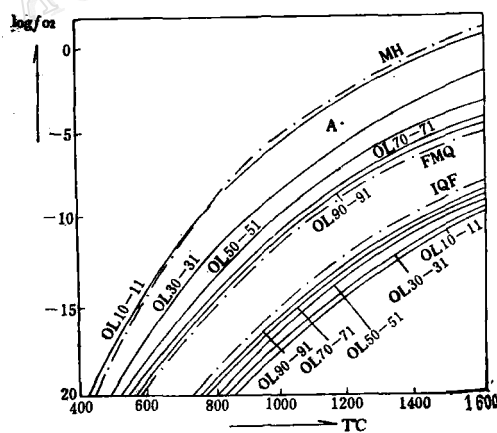


图4 橄榄石的 $\log f_{O_2}$ - T 曲线图 (图中OL表示Fa)

Fig. 4. $\log f_{O_2}$ versus T (temperature) diagram of olivine.

① 氧逸度的估算方法、原理及步骤, 参照周珣若1981年《氧逸度的估算及其在岩矿方面的应用》。

形成温度的近似值, 目的在于探讨岩体从下到上两者的相对变化情况, 以观察是否具规律性变化。其结果列于表2。据此作出变化曲线图, 并用广义幂函数转换公式拟合曲线求出曲线方程, 结果见表3及图5、图6。

表2 白马岩体形成温度、氧逸度数据表

韵律层	样品 顺序号	温 度 (℃)	氧 逸 度 (atm)	韵律层	样品 顺序号	温 度 (℃)	氧 逸 度 (atm)
Bb 韵 律 层	36	1170	$10^{-4.9}$	Ba 韵 律 层	18	1245	$10^{-3.4}$
	35	1175	$10^{-4.2}$		17	1190	$10^{-4.1}$
	34	1195	$10^{-4.7}$		16	1140	$10^{-5.2}$
	33	1100	$10^{-6.3}$		15	1245	$10^{-3.8}$
	32	1170	$10^{-4.9}$		14	1180	$10^{-5.0}$
	31	1180	$10^{-6.8}$		13	1215	$10^{-4.6}$
	30	1190	$10^{-4.2}$		12	1210	$10^{-4.6}$
	29	1290	$10^{-3.0}$		11	1378	$10^{-2.1}$
	28	1210	$10^{-4.2}$		10	1403	$10^{-1.7}$
	27	1240	$10^{-3.6}$		9	1375	$10^{-1.8}$
	26	1250	$10^{-4.4}$		8	1400	$10^{-2.3}$
	25	1230	$10^{-4.3}$	A 韵 律 层	7	1160	$10^{-4.9}$
	24	1305	$10^{-3.1}$		6	1210	$10^{-2.0}$
	23	1310	$10^{-3.2}$		5	1300	$10^{-3.4}$
	22	1220	$10^{-3.9}$		4	1245	$10^{-3.6}$
	21	1290	$10^{-3.1}$		3	1270	$10^{-3.3}$
	20	1255	$10^{-3.2}$		2	1255	$10^{-3.1}$
	19	1190	$10^{-6.0}$		1	1300	$10^{-3.4}$

注: Bb韵律层顶部剔除了两个受后期正长岩脉混染的样品。

表3 岩体从下至上相对位置与温度、氧逸度的相关方程表

韵律层	点 数	因 变 量	方 程 系 数			相关系数	临 界 值 $\alpha = 0.05$
			a	b	λ		
Bb	17	T	1338.1598	-0.2936	2.0	-0.7323	0.4822
		$\log f_{O_2}$	5.7430	-2.5239	0.1	-0.6832	
Ba	12	T	9110.3990	-12047.3354	-1.5	-0.8471	0.5760
		$\log f_{O_2}$	80.7405	-129.6793	-1.5	-0.7116	
A	7	T	1274.0075	-0.0025	6.5	-0.8691	0.7545
		$\log f_{O_2}$	-3.1333	-2.0864×10^{-49}	60.0	-0.7843	
A + Ba + Bb	36	T	1274.6439	-0.0370	2.5	-0.4856	0.3291
		$\log f_{O_2}$	-3.1565	-0.0122	1.5	-0.5122	

从表2、表3和图5、图6中可以看出白马岩体的氧逸度一般在 10^{-5}atm — 10^{-2}atm 之间, 最高为 $10^{-1.7}\text{atm}$, 最低为 $10^{-6.4}\text{atm}$; 形成温度(近似值)一般在1150—1350℃, 最低为1100℃, 最高为1403℃。岩体从下到上其氧逸度和温度逐渐降低。各韵律层亦有相应的变

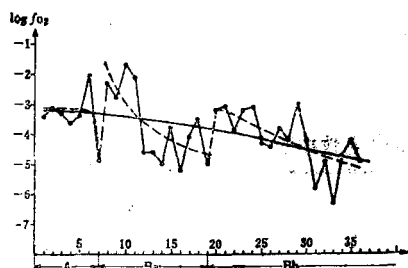


图 5 白马岩体成岩过程中氧逸度变化趋势图

Fig. 5. Diagram illustrating variation trend of oxygen fugacities during the formation of Baima intrusive body.

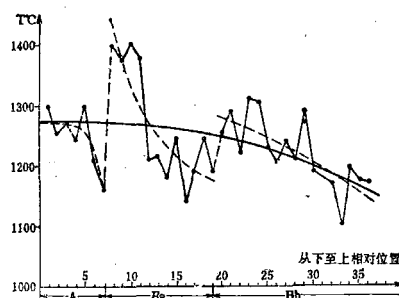


图 6 白马岩体成岩过程中结晶温度变化趋势图

Fig. 6. Diagram illustrating variation trend of crystallization temperature during the formation of Baima intrusive body.

化规律。造成这种现象的原因可能是由于各韵律层底部，特别是岩体底部，近于开放系统，氧逸度较高^[3]。自岩体（或韵律层）底部向上，随着温度、压力的降低，氧逸度也逐渐降低。

此外，我们还选取红格岩体第Ⅲ韵律层（主矿体赋存于此韵律层底部）作见矿距离回归分析，以了解岩石化学成分在一个韵律层内的变化规律。此方法为地质科学院矿床地质研究所四室的同志首先提出^[4]，并用于研究祁连山某超基性岩体，效果较好。其作法是以样品化学分析数据为自变量，每个样品至韵律底部矿体顶板的距离为因变量，建立距离与变量组合间的回归方程。利用此方程来研究岩石化学成分从上而下的变化规律和预测矿体的埋藏深度。

相关及回归分析结果证明：虽然岩体内大韵律中又包含小韵律，但并未破坏岩石化学成分与距韵律层底部矿体顶板的距离间的相关关系。选入 TFe 、 V_2O_5 、 Co 、 P_2O_5 四个变量时，复相关系数为0.768，大于临界值0.215。 TFe 、 TiO_2 、 V_2O_5 、 Ni 、 Cr_2O_3 等与距离呈负相关关系，即韵律层从上至下，随距离缩小，这些成分含量渐增，它们主要富集在韵律层下部或底部。这与白马岩体的元素和矿物空间分布的统计分析的结果是一致的。

三、几点认识

（一）白马岩体的元素和矿物的空间分布特征、岩石形成温度和氧逸度统计分析结果（表1、2、3）表明：岩体内元素和矿物分布的实际顺序与元素的原子量的大小顺序密切相关；岩石的形成温度、氧逸度与岩体从下到上的相对位置密切相关。结合图2、5、6可清楚看出：重元素、重矿物堆积在下，轻元素、轻矿物堆积在上；岩体从下至上其温度、氧逸度逐渐降低，有明显的总体渐变规律。这说明白马岩体的成岩成矿过程是在基性岩浆进入地壳以后，随着温度、压力的降低，向着基性程度降低的方向演化，基本上按鲍文反应系列逐次结晶，并在重力作用下进行分异堆积。结合矿石中铁钛氧化物主要呈半自形或他形粒状集合体充填于先晶出的造岩矿物（橄榄石、辉石、斜长石）颗粒之间，构成典型的海绵陨铁结构和

填隙结构（仅有少量铁钛氧化物呈自形晶先产出，并被辉石包裹而成嵌晶结构）的特点，说明钒钛磁铁矿的主要成矿阶段是在岩浆晚期阶段，实属典型的岩浆晚期矿床，并非后期矿浆贯入矿床。

红格岩体，见矿距离回归分析的结果同白马岩体的元素和矿物空间分布的统计分析结果的结论是一致的。两岩体的成岩成矿机理也应相似。

（二）图2、5、6不仅显示白马岩体从下到上有明显的总体变化规律，而且还清楚地显示出三个大旋回，每个旋回的变化规律与总体规律一致，只是变化速率不同而已，其界线恰好与地质上划分的三个韵律层（A、Ba、Bb）相吻合。这种韵律层的形成机理，我们认为可能是由于岩浆在结晶分异过程中，在固结成岩以前，受到同源岩浆间歇性补给的影响。补给一次，使岩浆温度、压力回升一次，并使由于矿物晶出而淡化了的硅镁矿物成分的浓度再次增大，然后随着温度、压力的降低又逐次结晶分异堆积，补给一次形成一个大韵律层。结合我们野外观察到的韵律层间的接触关系均为相变接触，未发现侵入接触和火成角砾等强烈岩浆活动的迹象，说明这种间歇性补给的量没有达到破坏原始岩浆的结晶分异顺序和总体变化规律的程度，这同计算结果是相吻合的。

（三）从白马、辛阶，坝头上三岩体元素堆积顺序的统计分析结果，说明岩体分异愈好，层状构造愈发育，重力作用愈显著，亦愈有利于成矿。

本文在编写过程中，得到了我队周信国，田竟亚工程师，地质科学院矿床地质研究所朱裕生工程师的指导和帮助，在此一并致谢。

参 考 文 献

- 〔1〕 骆跃南 1981 攀枝花地区辛阶含钛铬铁矿的层状超镁铁—铁镁岩岩体的矿化特征 地球化学 第1期
- 〔2〕 南京大学地质系 1979 地球化学（修订本） 科学出版社
- 〔3〕 卢记仁等 1980 四川红格层状钒钛磁铁矿床的分布和状态 中国地质科学院矿床所分刊 第一卷 第一号
- 〔4〕 中国地质科学院地质矿产研究所四室数学地质组 1978 祁连山某超基性岩体矿化特征的统计分析 国际交流地质学术论文集（4）物探、化探 地质出版社
- 〔5〕 Krubein, W. C. and Graybill, R. A., 1965, An Introduction to statistical models in geology. McGraw-Hill Book Company.
- 〔6〕 John M. Cubitt, 1978, Statistical Analysis in Geology. Dowden, Hutchison and Ross, Inc.

GEOMATHEMATIC EVIDENCE FOR THE DIFFERENTIATION NATURE OF THE BAIMA AND HONGGE LAYERED INTRUSIVE BODIES IN PANXI AREA, SICHUAN PROVINCE

Guo Luhe, Yang Benjin, Zhang Dongmei and Zeng Qing

(Panxi Geological Team, Geological Bureau of Sichuan Province)

Abstract

The vanadium-bearing titanomagnetite deposits in Panxi area are gigantic in size, and there have been mainly two different hypotheses on the origin of ore-bearing basic-ultrabasic masses and the metallogenic mechanism. Some geologists argue for the magmatic crystallization differentiation—igneous accumulation, whereas others favor the injection of late magma. It is reasonable to suppose that the former argument should be supported by systematic variations in petrochemical compositions and some other parameters in downward succession, and that no such variations might be observed if the latter claim could hold water. In order to seek a solution to these disputes, the authors have made some statistical calculations in such aspects as spatial distribution of chemical elements and minerals, variation regularity of rock-forming temperatures and oxygen fugacities, and the relations between distance of sample from the top of the major ore bed and the chemical composition.

The resulting data show the presence of a close connection between the sequence of accumulation of elements in the rock masses and the weight of those elements; in spatial distribution, heavy elements and minerals are concentrated in lower portion and light ones in upper portion; rock-forming temperatures and fugacities decrease progressively from the bottom upward; chemical compositions of the rock masses also show systematic variations in upward direction with the gradual increase in acidities and the gradual decrease in basicities and ore-forming constituents such as TFe, TiO_2 , V_2O_5 and Cr_2O_3 . In addition to these overall regular variations, the rock masses exhibit evidently three huge accumulation cycles with the boundaries in accordance with what has been recorded in the field. Spatial distribution of elements and minerals in each cycle resembles their overall distribution in the whole rock

mass. Gravity has caused the concentration of heavier elements, such as iron, titanium and vanadium, in the lower part of each cycle to form ores. An investigation into the Baima, Xingjie and Batoushang intrusive masses shows that perfect differentiation, well-developed layered structure and the action of gravity are all factors favorable for ore deposition.

All these phenomena point to the characteristics of geologic bodies produced by crystallization differentiation and action of gravity during the cooling of magma. Rhythmic cycle might have been the result of the intermittent supply of some cognate materials prior to the cooling and consolidation of the magma. The Baima and Hongge basic-ultrabasic rock masses and the vanadium-bearing titanomagnetite deposits contained in them are hence products of magmatic crystallization differentiation-igneous accumulation.

新晃贡溪重晶石矿地质简介

A BRIEF ACCOUNT OF THE GONGXI BARITE DEPOSIT AT XINHUANG, HUNAN PROVINCE

新晃贡溪重晶石矿是我国目前发现的规模最大的一个沉积型重晶石矿。矿区位于湘黔两省接壤处。大地构造位置属扬子地台江南古陆的雪峰古陆湘黔桂隆起带。

含矿岩系为震旦系上统陡山沱组白云岩、留茶坡组硅质岩及寒武系下统牛蹄塘组下段碳质页岩。其中后者是主要含矿层，由碳质页岩、重晶石、钙质磷块岩、硅质岩组成，厚10.8—11.72米。重晶石矿体赋存于含矿层中部，位钙质磷块岩之上，碳质页岩之下。含矿层底界清楚，顶界与碳质页岩呈过渡关系。

矿体呈层状、似层状。一般走向长几公里，最长20多公里，厚1.5—3.0米，最大厚度7.0米，全矿区平均厚度2.04米。矿层产状平缓，构造简单，往深部厚度增大。富矿往往位于矿层的中部或中下部。

矿石的矿物成分主要有重晶石、方解石、炭泥质及高岭石。矿石结构以镶嵌粒状变晶结构为主，构造以块状和条纹状为主。矿石的化学成分(%)为：BaSO₄ 72.39, Al₂O₃ 2.05, Fe₂O₃ 1.97, SiO₂ 9.04, CaO 5.03, MgO 0.43, P₂O₅ 0.64, BaCO₃ 1.28, 烧失量7.72。

氧化作用可使碳酸盐及炭泥质部分流失，BaSO₄相对富集，一般可提高品位5%左右。

(湖南省地矿局407队吴矿山供稿)