

岩石学混合计算在岩浆结晶分异作用
研究中的应用

——以云南白马寨镍矿区煌斑岩为例

黄智龙¹, 管涛^{1,2}, 谢力华¹, 许德如^{1,3}

(1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学开放室, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640)

摘要:公式 $C_L^i = C_{0,L}^i F^{(D^i-1)}$ 为岩浆结晶分异过程中的微量元素地球化学模型, 但如何确定式中残余熔体的重量百分比 (F) 和熔体中分离出来的矿物相的总分配系数 (D^i) 一直是个难题。本文介绍了一种直接计算出残余熔体比例 (F) 和岩浆结晶矿物比例 (以此计算出 D^i) 的方法——岩石学混合计算法的基本原理, 以云南白马寨镍矿区煌斑岩为例, 介绍了该方法在岩浆结晶分异作用研究中的应用。

关键词: 岩石学混合计算; 结晶分异作用; 煌斑岩; 云南白马寨镍矿床

中图分类号: P584 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1552(2003)03-0237-06

1 问题的提出

结晶分异作用是岩浆演化的重要方式, 在成因岩石学研究中具有重要地位。岩浆结晶分异过程中的微量元素行为采用 Greenland (1970) 修正的 Neuman (1954) 模型来描述, 即:

$$C_L^i = C_{0,L}^i F^{(D^i-1)} \quad (1)$$

(1) 式中 C_L^i 为微量元素 i 在分异熔体中的浓度; $C_{0,L}^i$ 为微量元素 i 在未曾结晶的母源熔体中的浓度; F 为残余熔体的重量百分比, $1-F$ 为结晶分异程度; D^i 为微量元素 i 在熔体中分离出来的矿物相的总分配系数。在一已知岩体中, 根据不同岩相的矿物组合及有关地球化学参数, 可以确定代表原始熔体成分的岩相, 即(1)式中的 $C_{0,L}^i$ 可通过实测获得。目前常采用两种方法确定(1)式中的 F 和 D^i , 即强不相容元素法 (Allegre and Minster, 1978) 和 lg-lg 图

解法 (Cocherine, 1986)。

强不相容元素法的基本原理: 轻稀土元素 (LREE) 等强不相容元素在橄榄石和辉石等岩浆早期结晶矿物相中的分配系数很小 (表 1), 因而 $D^i \approx 0$, 由(1)式可得:

$$F = C_{0,L}^i / C_L^i \quad (2)$$

由于岩浆结晶分异过程中伴随有少量磷灰石、锆石等副矿物晶出, 而强不相容元素在这些副矿物中的分配系数很大 (表 1), 可见, D^i 并不约等于 0, 也就是说此时(2)式并不成立。

lg-lg 图解法的基本原理: 在岩浆结晶分异过程中, 熔体和结晶相中的相容元素 (如 Ni、Cr 等) 和不相容元素含量均呈有规律增减, 因而岩石在 lg C_1 -lg C_2 图解法 (C_1 和 C_2 分别为相容元素和不相容元素的含量) 中沿一条斜率为 α 的直线分布:

$$\alpha = (D_1 - 1) / (D_2 - 1) \quad (3)$$

利用连续近似法可以计算出 D_1 和 D_2 , 然后再计算

收稿日期: 2003-02-09; 改回日期: 2003-04-11

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (G1999043203) 和中国科学院知识创新工程项目 (KZCXZ-101)。

作者简介: 黄智龙 (1967-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩石地球化学研究。

出 D^i , 代入 (1) 式计算出 F [计算过程详见文献 (Cocherine, 1986)]。该方法存在以下不可回避的问题 (Cocherine, 1986): ①拟合出一条斜率为 α 的直线需要大量同源岩浆结晶分异形成的样品; ②连续近似法计算过程复杂、人为因素较多; ③不同相容元素和不相容元素对的计算结果有很大差别。因而计算结果可能与实际情况有较大差距。

本文介绍一种直接计算残余熔体和岩浆结晶矿

物比例的方法——岩石学混合计算法, 前者为 (1) 式中的 F , 而 (1) 式中的 D^i 为:

$$D^i = \sum_{j=1}^n X_j K_j^{i/L} \quad (4)$$

(4) 式中 X_j 为结晶相中 j 矿物所占比例, $K_j^{i/L}$ 为 i 元素在 j 矿物中的分配系数, n 为结晶相矿物数量。本文以云南白马寨镍矿区煌斑岩为例, 介绍该方法在岩浆结晶分异作用研究中的应用。

表 1 REE 在碱性基性—超基性岩常见矿物中的分配系数 ($D^{\text{矿物/熔体}}$)

Table 1 Partition coefficients of REE in minerals from alkaline basic-ultrabasic rocks ($D^{\text{mineral/melt}}$)

矿物	橄榄石	斜方辉石	单斜辉石	角闪石	金云母	钾长石	磷灰石	锆石
La	0.01	0.01	0.18	0.2	0.06	0.080	9.93	0.08
Ce	0.01	0.015	0.21	0.32	0.034	0.042	10.7	0.13
Nd	0.01	0.03	0.35	0.44	0.032	0.040	11.1	
Sm	0.01	0.067	0.53	0.8	0.031	0.029	9.87	0.38
Eu	0.007	0.02	0.52	1.2	0.03	0.210	9.37	1.26
Gd	0.008	0.033	0.59	0.86	0.03	0.040		
Tb	0.01	0.05	0.61	1.3	0.03	0.040	7.97	
Dy	0.01	0.06	0.65	0.78	0.03	0.032		
Ho	0.02	0.05	0.65	1.1	0.032	0.033		
Er	0.01	0.04	0.66	1.05	0.034	0.034		
Tm	0.04	0.054	0.46	1.0	0.035	0.060		
Yb	0.01	0.05	0.60	0.8	0.042	0.050	1.77	138
Lu	0.016	0.04	0.45	0.51	0.042	0.049	3.83	172

注: 橄榄石、斜方辉石和角闪石的分配系数数据文献 (黄智龙等, 1999); 其余矿物的分配系数数据文献 (干国梁, 1993), 其中钾长石的部分分配系数为内插值。

2 方法简介

岩石学混合计算 (Petrological mixing calculation) 是用几种成分的混合物来估算另一种成分。此法较早由 Bryan 等 (1969) 提出, 后经补充完善 (Wright and Doherty, 1970; Banks, 1979; Le Maitre, 1979)。目前岩石学混合计算多采用最小二乘法和线性规划法, 黄开年 (1984) 已对两种方法均作了较详细的介绍和评述, 本文以实际矿物含量计算为例简单介绍最小二乘法的基本原理。

设某种岩石的主要氧化物重量百分含量为 X_1, X_2, \dots, X_m , 这种岩石由 n 种矿物组成, 假定各矿物在岩石中相对含量分别为 A_1, A_2, \dots, A_m , 已知第 j 种氧化物在各矿物的重量百分比分别为 $Y_{1j}, Y_{2j}, \dots, Y_{nj}$, 用这些矿物来计算该岩石的化学成分。若岩石的主要氧化物重量百分含量的估算值为 T_1, T_2, \dots, T_m , 那么可得下列线性方程:

$$\begin{aligned} T_1 &= A_1 Y_{11} + A_2 Y_{21} + \dots + A_n Y_{n1} \\ T_2 &= A_1 Y_{12} + A_2 Y_{22} + \dots + A_n Y_{n2} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\dots \dots \dots$$

$$T_m = A_1 Y_{1m} + A_2 Y_{2m} + \dots + A_n Y_{nm}$$

(5) 式可简写为:

$$T_j = \sum_{i=1}^n A_i Y_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

主要氧化物观测值与估算值之差:

$$X_j - T_j = B_j \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

称为拟合差 (misfit) (Banks, 1979)。在实际矿物含量分析中要解决的数学问题是, 寻求 (7) 式的解, 使拟合差某种测度极小化。经常使用的一种测度是单个拟合差平方和, 也就是使 (8) 式极小化, 这就是最小二乘法的基本出发点。

$$S_m = \sum_{j=1}^m (X_j - T_j)^2 = \sum_{j=1}^m (X_j - A_1 Y_{1j} - \dots - A_n Y_{nj})^2 \quad (8)$$

3 计算实例

云南白马寨镍矿床位于“三江”富碱侵入岩带

的南段,煌斑岩呈岩墙和岩脉在矿区广泛出露,为成矿后期产物(煌斑岩岩墙和岩脉穿切矿体),管涛等(2003)详细介绍了该区煌斑岩地质、矿物学和地球化学特征,并对其地幔源区进行了探讨,认为“产于矿区不同中段和不同产状的煌斑岩为同源富集地幔部分熔融的产物,岩浆过程中存在结晶分异作用”。本文利用管涛等(2003)的主量元素和稀土元素资料,介绍岩石学混合计算在岩浆结晶分异作用研究中的应用。

3.1 数据分析

矿区煌斑岩样品 BMZ-18、BMZ-21、BMZ-27 和 BMZ-101 的主量元素和 REE 含量相近,其 MgO 含量(9.65%~10.29%,去烧失量后为 10.55%~11.46%)、 M 值 [$100(\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}))$,下同;82.3~86.4] 和 Ni 含量(255×10^{-6} ~ 286×10^{-6})均与原始岩浆的识别标准(Sata,1977;邓晋福,1984;莫宣学,1988)一致,可代表本区煌斑岩的原始岩浆成分,本文取这 4 件样品的平均值作为熔体 I(表 2);样品 BMZ-54、BMZ-56、BMZ-90 和 BMZ-108 的主量元素和 REE 含量相近,其 MgO 含量(6.57%~7.79%,去烧失量后为 7.08%~8.01%)、 M 值(78.0~85.7) 和 Ni 含量(114×10^{-6} ~ 133×10^{-6})均低于熔体 I,为熔体 I 相对早阶段结晶产物,本文

取这 4 件样品的平均值作为熔体 II(表 2);样品 BMZ-2、BMZ-28 和 BMZ-87 主量元素和 REE 含量相近,其 MgO 含量(4.47%~5.21%,去烧失量后为 4.88%~5.69%)、 M 值(67.4~76.8) 和 Ni 含量(113×10^{-6} ~ 140×10^{-6})也低于熔体 I,且 MgO 含量和 M 值还低于熔体 II,应为熔体 I 相对晚阶段结晶产物,本文取这 3 件样品的平均值作为熔体 III(表 2)。

3.2 计算过程

本文对矿区煌斑岩岩浆 3 个结晶分异过程进行了模拟计算,即熔体 I→熔体 II、熔体 I→熔体 III 和熔体 II→熔体 III。计算方法(以熔体 I→熔体 II 为例)是:利用熔体 II 和结晶矿物的成分来模拟熔体 I 成分,通过岩石学混合计算方程计算出熔体 II 和结晶矿物的比例,前者为(1)式中的 F ,将后者代入(4)式计算出 D^i ,然后将 F 、 D^i 以及熔体 I 的 REE 含量(C_{0L}^i)代入(1)式计算出熔体 II 的 REE 含量(C_L^i),最后将熔体 II 的 REE 含量计算结果与实测值进行对比。白马寨镍矿区煌斑岩造岩矿物中的主要暗色矿物为单斜辉石和金云母,浅色矿物为钾长石,副矿物为磷灰石和少量锆石(管涛等,2003)。因而计算过程中的结晶矿物选用单斜辉石、金云母和钾长石。由于本文没有测定矿区煌斑岩的矿物成分,但管涛等(2003)的对比分

表 2 岩浆结晶分异过程模拟

Table 2 Modelling for the processes of fractional crystallization

熔体成分	熔体 I	熔体 II	熔体 III	过程 I	过程 II	过程 III	单斜辉石	金云母	钾长石
SiO ₂	54.79	58.45	55.33	54.96	54.35	57.79	53.92	39.96	64.34
TiO ₂	0.51	0.50	0.56	0.73	0.79	0.53	0.20	1.74	0.22
Al ₂ O ₃	13.51	13.10	15.03	12.73	13.71	13.94	1.20	13.48	18.07
FeO _t	5.24	4.97	5.81	5.38	5.72	4.86	4.80	6.94	0.42
MnO	0.09	0.17	0.09	0.16	0.11	0.11	0.21	0.10	0.06
MgO	10.95	7.52	5.27	10.81	10.60	7.28	16.83	22.05	0.08
CaO	6.50	6.81	8.21	6.20	7.71	8.56	22.42	0.07	0.37
Na ₂ O	2.34	2.75	2.70	2.21	1.94	2.25	0.41	0.42	2.47
K ₂ O	5.34	5.06	6.12	5.88	5.20	5.13	0.05	10.21	13.43
P ₂ O ₅	0.55	0.46	0.62						

注:①熔体 I 为煌斑岩样品 BMZ-18、BMZ-21、BMZ-27 和 BMZ-101 的平均值(去烧失量再换算成 100%; $\text{FeO}_t = \text{FeO} + 0.9\text{Fe}_2\text{O}_3$;下同),代表矿区煌斑岩原始岩浆成分。

②熔体 II 为煌斑岩样品 BMZ-54、BMZ-56、BMZ-90 和 BMZ-108 的平均值,为熔体 I 相对早阶段结晶产物。

③熔体 III 为煌斑岩样品 BMZ-2、BMZ-28 和 BMZ-87 的平均值,为熔体 I 相对晚阶段结晶产物。

④过程 I 为熔体 I→熔体 II 的模拟计算结果,结晶矿物比例为单斜辉石 4.30%、金云母 19.44%,熔体 II 的比例为 76.26%,拟合差为 1.122。

⑤过程 II 为熔体 I→熔体 III 的模拟计算结果,结晶矿物比例为单斜辉石 12.42%、金云母 23.47%、钾长石 8.30%,熔体 III 的比例为 55.81,拟合差为 5.755。

⑥过程 III 为熔体 II→熔体 III 的模拟计算结果,结晶矿物比例为单斜辉石 14.71%、金云母 6.34%、钾长石 19.87%,熔体 III 的比例为 59.74%,拟合差为 8.809。

⑦单斜辉石、金云母和钾长石的成分为云南老王寨金矿区煌斑岩相应矿物的平均成分(黄智龙等,1999)。

析结果表明,本区煌斑岩与同在“三江”富碱侵入岩带的云南老王寨金矿区煌斑岩具有相同构造背景、相似的矿物组合和地球化学特征,因而本文在计算过程中利用老王寨金矿区煌斑岩中单斜辉石、金云母和钾长石的平均成分(表 2)。

3.3 计算结果

表 2 为矿区煌斑岩岩浆 3 个结晶分异过程残余熔体和结晶矿物相比例计算结果,表 3 为利用(1)式计算的残余熔体 REE 含量。

(1) 熔体 I→熔体 II: 计算的结晶矿物比例为单斜辉石 4.30%、金云母 19.44%,钾长石出现较小的负值,认为该结晶过程中没有结晶出钾长石;熔体 II 的比例为 76.26%,即结晶分异程度为 23.74%;拟合差为 1.122。计算出熔体 II 的轻稀土元素(LREE)含量(表 3 第④列)与实测值(表 3 第②列)大体相似,但前者的重稀土元素(HREE)含量相对较高。如果考虑在该过程中有 0.50% 的锆石(根据矿区代表

熔体 II 岩石薄片中的副矿物锆石的百分含量估计确定此值;下同)晶出,计算出熔体 II 的 REE 含量(表 3 第⑤列)更接近实测值(表 3 第②列)。

(2) 熔体 I→熔体 III: 计算的结晶矿物比例为单斜辉石 12.42%、金云母 23.47%、钾长石 8.30%;熔体 III 的比例为 55.81%,即结晶分异程度为 44.15%;拟合差为 5.755。计算出的熔体 III 的 LREE 和 HREE(表 3 第⑥列)均相对高于实测值(表 3 第③列)。如果考虑在该过程中有 1.50% 的磷灰石和 0.50% 的锆石晶出,计算出熔体 III 的 REE 含量(表 3 第⑦列)也接近实测值(表 3 第③列)。

(3) 熔体 II→熔体 III: 计算的结晶矿物比例为单斜辉石 14.71%、金云母 6.34%、钾长石 19.87%;熔体 III 的比例为 59.74%,即结晶分异程度为 40.26%;拟合差为 8.809。计算出的熔体 III 的 LREE 和 HREE(表 3 第⑧列)均明显高于实测值(表 3 第③列)。即使考虑在该过程中有 3.00% 的磷灰石(该值

表 3 岩浆结晶分异过程中熔体 REE 含量模拟计算结果($\times 10^{-6}$)

Table 3 Modeling results of REE contents in melts of fractional crystallization ($\times 10^{-6}$)

序号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
熔体成分	熔体 I	熔体 II	熔体 III	过程 I - 1	过程 I - 2	过程 II - 1	过程 II - 2	过程 III - 1	过程 III - 2
La	24.99	31.88	39.66	32.60	32.59	43.67	40.02	52.12	44.70
Ce	55.35	69.82	87.76	72.27	72.26	97.03	88.32	114.42	96.95
Nd	25.51	32.07	40.22	33.26		44.28		52.02	
Sm	5.44	6.44	8.22	7.08	7.07	9.33	8.55	10.32	8.85
Eu	1.63	1.76	2.30	2.12	2.12	2.77	2.55	2.77	2.39
Gd	4.44	5.08	6.63	5.77		7.58		8.09	
Tb	0.62	0.68	0.85	0.81		1.06		1.08	
Dy	3.28	3.65	4.35	4.26		5.58		5.79	
Ho	0.63	0.70	0.82	0.82		1.07		1.11	
Er	1.73	1.86	2.14	2.25		2.94		2.95	
Tm	0.23	0.26	0.28	0.30		0.40		0.42	
Yb	1.60	1.75	1.84	2.08	1.72	2.72	1.79	2.78	1.90
Lu	0.23	0.26	0.27	0.30	0.24	0.40	0.23	0.42	0.25

注:①熔体 I 为样品 BMZ-18、BMZ-21、BMZ-27 和 BMZ-101 的平均 REE 含量,代表矿区煌斑岩原始岩浆成分。

②熔体 II 为样品 BMZ-54、BMZ-56、BMZ-90 和 BMZ-108 的平均 REE 含量,为熔体 I 相对早阶段结晶产物。

③熔体 III 为样品 BMZ-2、BMZ-28 和 BMZ-87 的平均 REE 含量,为熔体 I 相对晚阶段结晶产物。

④过程 I - 1 为熔体 I→熔体 II 计算的熔体 II 的 REE 含量,结晶矿物比例为单斜辉石 4.30%、金云母 19.44%,熔体 II 的比例为 76.26%。

⑤过程 I - 2 为熔体 I→熔体 II 计算的熔体 II 的 REE 含量,结晶矿物比例为单斜辉石 4.30%、金云母 19.44%、锆石 0.50%,熔体 II 的比例为 76.26%。

⑥过程 II - 1 为熔体 I→熔体 III 计算的熔体 III 的 REE 含量,结晶矿物比例为单斜辉石 12.42%、金云母 23.47%、钾长石 8.30%,熔体 III 的比例为 55.81%。

⑦过程 II - 2 为熔体 I→熔体 III 计算的熔体 III 的 REE 含量,结晶矿物比例为单斜辉石 12.42%、金云母 23.47%、钾长石 8.30%、磷灰石 1.50%、锆石 0.50%,熔体 III 的比例为 55.81%。

⑧过程 III - 1 为熔体 II→熔体 III 计算的熔体 III 的 REE 含量,结晶矿物比例为单斜辉石 14.71%、金云母 6.34%、钾长石 19.87%,熔体 III 的比例为 59.74%。

⑨过程 III - 2 为熔体 II→熔体 III 计算的熔体 III 的 REE 含量,结晶矿物比例为单斜辉石 14.71%、金云母 6.34%、钾长石 19.87%、磷灰石 3.00%、锆石 0.50%,熔体 III 的比例为 59.74%。

已高出矿区代表熔体Ⅲ岩石薄片中的副矿物磷灰石的估计百分含量 1.50%) 和 0.50% 的锆石晶出, 计算出熔体Ⅲ的 LREE 含量(表 3 第⑨列)也相对高于实测值(表 3 第③列)。

3.4 讨论

从以上的计算结果看, 熔体 I→熔体 II 和熔体 I→熔体 III 结晶过程计算的残余熔体的 REE 含量均与实测值相近, 表明矿区代表熔体 II 成分的煌斑岩为原始岩浆(熔体 I) 相对低结晶分异程度(23.74%) 的产物, 而代表熔体 III 成分的煌斑岩则是原始岩浆(熔体 I) 相对高结晶分异程度(44.15%) 的结果。熔体 II→熔体 III 结晶过程计算的残余熔体的 REE 含量与实测值有较大差别, 暗示矿区代表熔体 III 成分的煌斑岩可能不是熔体 II (原始岩浆低结晶分异程度的残余熔体) 继续结晶分异的产物。该结论同样被矿区代表熔体 II 和熔体 III 岩石的地球化学特征所证实(表 2、表 3), 前者相对高 MgO、REE, 低 Al₂O₃、K₂O, 与岩浆结晶分异演化的地球化学变化特征吻合; 但前者相对高 SiO₂、Na₂O, 低 FeO_t、CaO, 以及两者的过渡金属含量相近(如代表熔体 II 岩石 Ni 含量为 114 × 10⁻⁶ ~ 133 × 10⁻⁶, 代表熔体 III 岩石 Ni 含量为 113 × 10⁻⁶ ~ 140 × 10⁻⁶), 明显不符合岩浆结晶分异演化的地球化学变化特征。

参考文献:

- 邓晋福. 1984. 原生玄武岩浆的起源及其识别标志. 地质研究, (2): 18 - 27.
- 干国梁. 1993. 矿物-熔体间元素分配系数资料及主要变化规律. 岩石矿物学杂志, 12(2): 144 - 181.
- 管涛, 黄智龙, 谢力华. 2003. 云南白马寨镍矿区煌斑岩地球化学, I. 主要元素和微量元素. 矿物学报, 待刊.
- 管涛, 黄智龙, 谢力华. 2003. 云南白马寨镍矿区煌斑岩地球化学, II. 地幔源区特征. 矿物学报, 待刊.
- 黄开年. 1984. 岩石学混合计算问题. 见: 岩石学研究(第四辑). 北京: 地质出版社. 147 - 159.
- 黄智龙, 刘丛强, 朱成明, 王联魁, 肖化云. 1999. 云南老王寨金矿区煌斑岩成因及其与金矿化的关系. 北京: 地质出版社. 38 - 61.
- 莫宜学. 1988. 中国东部新生代玄武岩岩浆的起源. 见: 池际尚主编. 中国东部新生代玄武岩及上地幔研究(附金伯利岩). 武汉: 中国地质大学出版社, 108 - 127.

References:

- Allegre C J and Minster J F. 1978. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes. *Earth Planet Sci Lett*, 38: 1 - 25.

- Banks R. 1979. The use of linear programming in the analysis of petrological mixing problem. *Mineral Petrol*, 70: 237 - 244.
- Bryan W B, Finger L W and Chayes F. 1969. Estimating proportion in petrographic mixing equations by least-squares approximation. *Science*, 163: 926 - 927.
- Cocherine A. 1986. Systematic use of trace element distribution patterns in log-log diagrams for plutonic suites. *Geochim Cosmochim Acta*, 11: 2517 - 2522.
- Deng Jinfu. 1984. The source and identification symbol of primary basaltic magma. *Geology Research*, (2): 18 - 27 (in Chinese with English abstract).
- Greenland L P. 1970. An equation for trace element distribution during magmatic crystallization. *Am Mineral*, 55: 455 - 465.
- Gan Guoliang. 1993. Data of elemental partitioning coefficient and changing regularity between mineral and melt. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 12(2): 144 - 181 (in Chinese with English abstract).
- Guan Tao, Huang Zhilong and Xie Lihua. 2003. Geochemistry of lamprophyres in Baimazhai nickel deposit: I. major and trace elements. *Acta Mineralogica Sinica* (In press) (in Chinese with English abstract).
- Guan Tao, Huang Zhilong and Xie Lihua. 2003. Geochemistry of lamprophyres in Baimazhai nickel deposit: II. characteristic of mantle source region. *Acta Mineralogica Sinica* (In press) (in Chinese with English abstract).
- Huang Kainian. 1984. Problems of petrological mixing calculation. In: *Petrological study* (the 4th edition). Beijing: Geological Publishing House, 147 - 159 (in Chinese).
- Huang Zhilong, Liu Congqiang, Zhu Chengming, Wang Liankui and Xiang Huayun. 1999. The origin of lamprophyres in Laowanzhai gold deposit, Yunnan Province and their relations with gold mineralization. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract), 38 - 61.
- Le Maitre R W. 1979. A new generalized petrological mixing model. *Mineral Petrol*, 71: 133 - 137.
- Mo Xuanxue. 1988. Genesis of Cenozoic basaltic magma in eastern China. In: Chi Jishang, eds. *Study on Cenozoic basalt and upper mantle in eastern China* (attach to kimberlite). Wuhan: China University of Geosciences Press, 108 - 127 (in Chinese).
- Neuman H. 1954. Trace element variations during fractional crystallization as calculated from the distribution law. *Geochim Cosmochim Acta*, 6: 90 - 99.
- Sata H. 1977. Nickel content of basaltic magmas: Identification of primary magmas and a measure of the degree of the olivine fractionation. *Lithos*, 10: 113 - 120.
- Wright T L and Doherty P C. 1970. A linear programming and least squares computer method for solving petrologic mixing problems. *Bull Geol Soc Am*, 81: 1995 - 2008.

PETROLOGICAL MIXING CALCULATION AND ITS APPLICATION TO MAGMA FRACTIONAL CRYSTALLIZATION

——A Case Study of Lamprophyres in Baimazhai Nickel Deposit, Yunnan Province

HUANG Zhi-long¹, GUAN Tao^{1,2}, XIE Li-hua¹ and XU De-ru¹

(1. *Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China*; 2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*; 3. *Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China*)

Abstract: $C_L^i = C_{0,L}^i F^{(D^i-1)}$ is a formula of minor elemental geochemical model for magma fractional crystallization. However, It is always a difficult problem to define the fraction of the residual melt (F) and total partition coefficient (D^i) of the separated mineral phase. In this paper, we have introduced the principle of petrological mixing calculation which can directly calculate the parameter of F and D^i , and it is applied to lamprophyres in the Baimazhai nickel deposit, Yunnan Province to prove there are fractional crystallization during its magma evolution.

Key words: Petrological mixing calculation; Fractional crystallization; Lamprophyre; Baimazhai nickel deposit, Yunnan