

高参考价值的真题、答案、学长笔记、辅导班课程，访问：www.kaoyancas.net

地球化学

——多媒体课件

完整版，请访问www.kaoyancas.net 科大科院考研网，专注于中科大、中科院考研

第四章 微量元素地球化学

本章内容

- ◆ 基本概念
- ◆ 微量元素在共存相中的分配
- ◆ 岩浆作用过程中微量元素的定量分配模型
- ◆ 稀土元素地球化学
- ◆ 微量元素的示踪意义



地球化学

微量元素地球化学是研究微量元素在地球及其子系统中的分布特征、化学作用及化学演化的一门分支学科。它根据系统的特征和微量元素的特性，阐明他们在地球系统中的分布分配，在自然体系中的性状以及在自然界的运动过程和演化历史。

微量元素可以作为地质—地球化学作用的示踪剂，其特色之处就是能近似定量地解决问题，使实际资料与模型设计结合起来。

为此，他们在解决当代地球化学的基础理论问题—如天体、地球、生命和元素的起源，为人类提供充足资源和良好生存环境等方面正发挥着重要作用。



一、基本概念

什么叫**微量 (minor) 或痕量 (trace) 元素** ?

人们常常**相对于**地壳中的主量元素而言，为此有人把地球化学体系中低于**0.1%**的元素，通称为微量元素。

然而，所谓主量和微量元素在自然界不同体系中是相对的概念，常因所处的体系不同而异，如K在地壳整体中是主量元素，但它在陨石中却被视为微量元素。

1968年Gast对微量元素的定义是：指的是不作为体系中任何相的主要化学计算组分存在的元素。

有的学者根据元素在所研究的地球化学体系中的浓度低到可以近似服从**稀溶液定律 (亨利定律)** 的范围，则称该元素为微量元素。**微量元素地球化学**是地球化学的一个重要分支，它研究在各种地球化学体系中**微量元素的分布、分配、共生组合及演化的规律**，其特色之处就是能够近似定量地解决问题，使实际资料和模型计算结合起来。



二、微量元素在共存相中的分配

在一定的环境（物理化学条件）中，一切自然作用体系均趋向于平衡。当达到平衡时，

	常量元素	微量元素
体系中的浓度	很高	极低
独立矿物	能形成独立矿物	不能形成独立矿物，但在平衡共存的矿物之间（或液相—固相之间）进行分配
控制因素	受相律控制($f=k-\phi+2$)，遵从化学计量原则	受自身及矿物的晶体化学性质和环境的物理化学条件控制，服从稀溶液定律，即在平衡共存的各相之间化学位相等

微量元素分配的微观理论—只是定性地说明问题。二十世纪三十年代的戈尔德施密特类质同像法则；五十年代林氏电负性法则；六十年代用晶体场理论讨论过渡族元素的分配规律；七十年代用分子轨道学说对共价键性质化合物元素分配的解释；八十年代引入了量子力学，量子化学观点……



1.前提条件：一定的温度、压力下，微量元素在两相中可以形成液态（或固态）的稀溶液；

2.微量元素在两相中的化学位计算

$$u_1 = u_1^\theta + RT \ln \alpha_1 \quad u_2 = u_2^\theta + RT \ln \alpha_2$$

u ：离子化学位； u^θ ：标准状态下化学位（25°C，1atm）

α ：离子活度（当溶液中离子的浓度 β 趋近于0时，活度与浓度成正比，比例系数 k 即亨利系数： $\alpha = k \beta$ ）； T ：体系的绝对温度；

R ：气体常数（8.314J/mol·K）；1和2：两个相。

3.微量元素在两相中分配达到平衡时：

$$u_1 = u_2 \rightarrow$$

$$\alpha_1 / \alpha_2 = k\beta_1 / k\beta_2 = \beta_1 / \beta_2 = e^{(u_2^\theta - u_1^\theta) / RT} = K_D(T, P) = \text{常数}$$

这就是能斯特分配定律：

一定温度压力下，微量元素在平衡共存的两相之间进行分配，其分配系数 K_D 是一常数，其大小等于微量元素在两相中浓度的比值。



4.进一步的讨论:

$u_1^0 > u_2^0: K_D < 1, \beta_1 < \beta_2$ -----微量元素更多的进入2相

$u_1^0 < u_2^0: K_D > 1, \beta_1 > \beta_2$ -----微量元素更多的进入1相

$u_1^0 = u_2^0: K_D = 1, \beta_1 = \beta_2$ -----微量元素在1、2相之间分配相等

可见，微量元素在某相中的化学位越低，它的含量就会越高，就像是水往低处流一样的道理

5.微量元素在岩石与熔体之间的分配系数：常用岩石中所有矿物的分配系数与岩石中各矿物含量的乘积之和一表达。

$$D^i = \sum_{j=1}^n K_D^i W_j$$

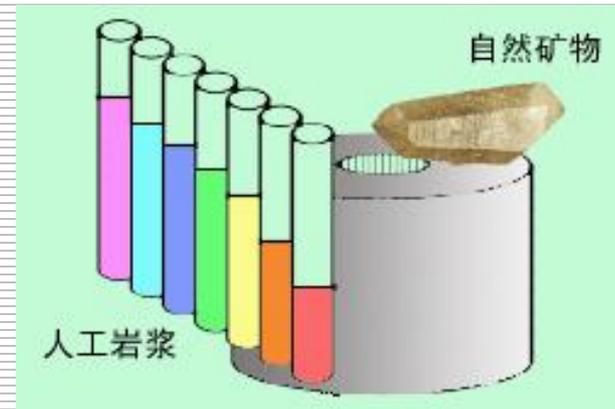
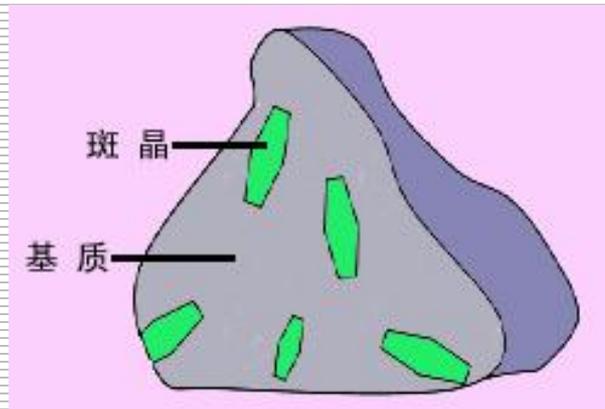
即 n : 含量微量元素 i 的矿物数 W_j : 第 j 种矿物的质量百分数 K_D^i : 第 j 种矿物对微量元素的简单分配系数



6.分配系数的测定：以岩浆作用过程中微量元素在结晶相（固相）和熔体相（液相）中的分配系数测定为例，目前有两种测定方法：

直接测定法：直接测定地质体中两平衡共存相如火山岩中的斑晶和基质中的微量元素浓度，再按分配定律进行计算。斑晶代表熔体结晶过程中形成的矿物，基质代表熔体相。

实验测定法：用化学试剂合成与天然岩浆成分相似的玻璃物质，实验使一种矿物与之达到微量元素的分配平衡，然后测定元素在两相中的浓度，计算得到分配系数。

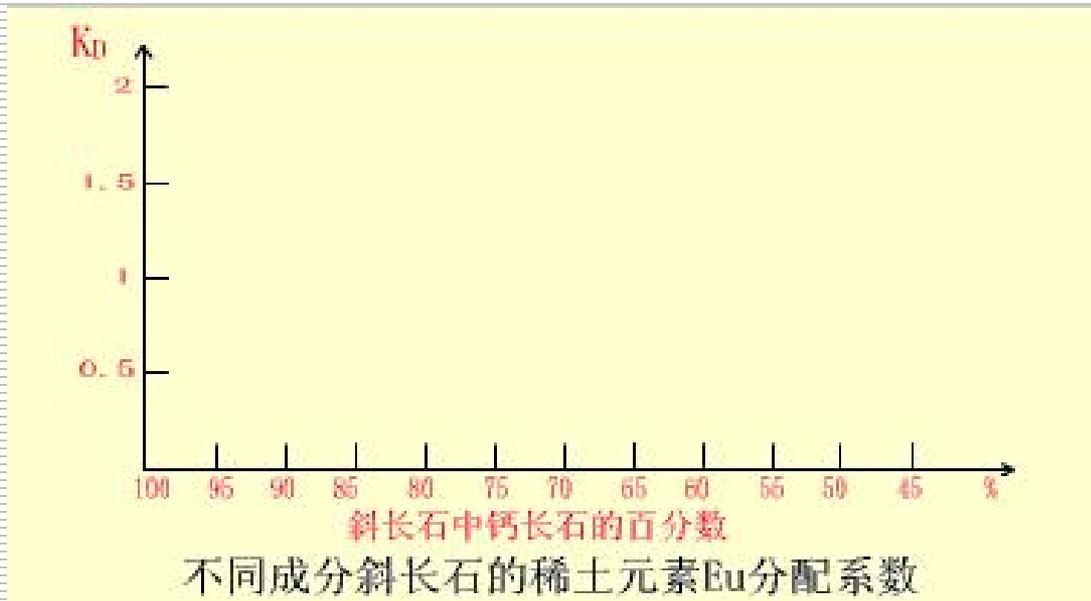


地球化学

7.分配系数的影响因素：

体系组分的影响—岩浆岩化学成分的变化在很大程度上取决于硅酸盐熔体的结构，不同硅酸盐熔体共存时微量元素分配情况明显不同；

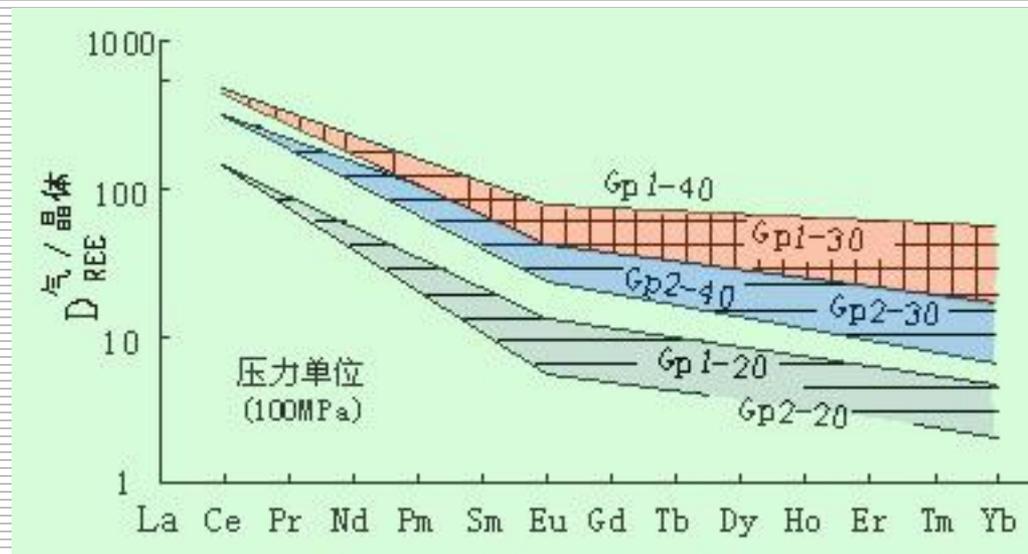
如斜长石中钙长石含量增多，稀土元素Eu在斜长石与熔体间的分配系数趋于减小。



地球化学

▲ **体系温度的影响**—由能斯特定律可以导出： $\ln KD = -(\Delta H/RT) + B$
式中： ΔH 表示微量元素在两相中的热焓变化， B 是积分常数。可见分配系数与体系温度的倒数呈线性关系，这也就是微量元素温度计的基本原理。

▲ **体系压力的影响**—目前对压力影响的研究报道甚少，但有一点已通过实验证实：在相当上地幔的压力条件下，稀土元素在富水的蒸汽和石榴子石、单斜辉石、斜方辉石、橄榄石之间的分配系数为1—200之间，分配系数随压力 (P_{H_2O}) 的增大而迅速地增加。



8.分配系数的应用:

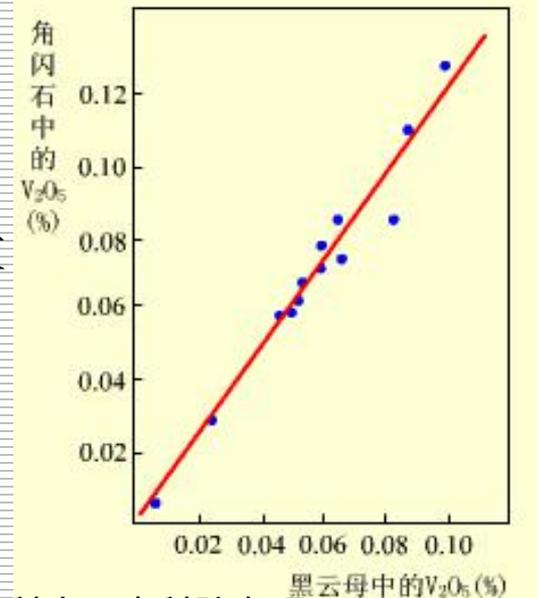
▲ **检验成岩、成矿过程的平衡性**——一定温度、压力下各相处于平衡时, 元素在共存矿物间的分配系数为一常数, 可据此来检验自然过程是否达到平衡。方法是:

①在体系的不同部位(为同时同成因的产物)采集若干个同种共存矿物对样品;

②测定矿物对中某微量元素的含量;

③计算分配系数, 若接近某固定值, 即则可视成岩、成矿过程达到了平衡。

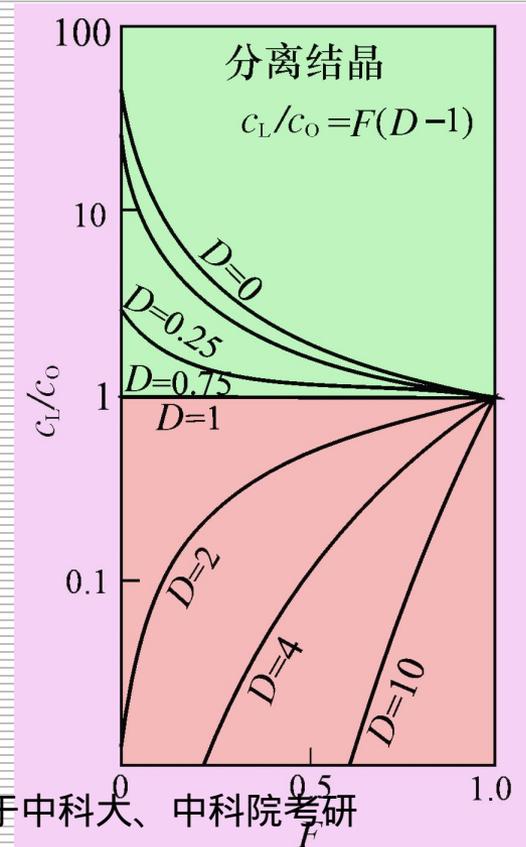
如加拿大魁北克变质岩地区, 在其不同区块成对地采集若干组共生的黑云母和角闪石样品, 分析其中 V_2O_3 含量, 并将其投入到黑云母--角闪石的 V_2O_3 (%) 含量。图中, 结果每对矿物的数据点几乎落在一条直线上, 这反映微量元素V在角闪石和黑云母间的分配系数 $KD_{角/黑} \approx 1.2$, 为一个常数, 从而证明了在变质过程中角闪石和黑云母是平衡反应的产物。



地球化学

▲ 判别岩浆结晶过程中微量元素的地球化学行为—利用瑞利分馏定律，将岩浆结晶中某微量元素 的瞬间浓度相对于该元素的原始浓度比值 ($X_{Tr熔体}/X_{Tr熔体}^0$) 作为纵坐标，以反映岩浆 结晶程度的F为横坐标，并赋予 K_D 不同的值， 就可做出反映元素行为的图解：① $K_D < 1$ 的微量元素： 都随着F值从1到0（代表结晶程度不断提高）的变化，而在残余的熔体中逐步富集起来，这些元素称为不相容元素

(incompatible element),如W、Sn、Mo、Cu等(微观角度：残余富集)；② $K_D > 1$ 的微量元素： 则倾向在结晶矿物中富集。随着矿物不断晶出，在残余熔浆中逐渐贫化，这些元素即相容元素 (compatible elements) ，如Ni、Co、Cr等（微观角度：晶体化学分散）。



▲ **微量元素分配系数温度计**—当微量元素在共存各相中分配达到平衡时，有 $\ln K_D = -(\Delta H/RT) + B$ 的函数关系，以 $-(\Delta H/R)$ 为斜率， B 为截距，即当在所讨论范围内 ΔH （热焓）可看作为常数时，分配系数（ K_D ）的对数与温度倒数（ $1/T$ ）存在线性关系。

方法是：测定待研究地质体中共生矿物对中某微量元素的含量，算出该元素在矿物对的分配系数，利用以上关系式即可计算出矿物结晶温度。

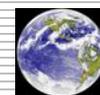


地球化学

样品号	温度(°C)	橄榄石Ni	单斜辉石Ni	K_D (橄/辉)
1	1160	1555	255	6.10
2	1120	1310	245	5.35
3	1075	955	240	3.98
4	1070	935	235	3.98
5	1050	840	220	3.82

$\ln K_D = -(70340/RT) + 7.65$ $\Delta H = 70340 \text{ J/mol}$, $B = 7.65$

如哈克里等人对夏威夷活火山中玄武岩浆与正在结晶的橄榄岩和单斜辉石之间Ni元素的分配进行的研究：在火山熔岩不同温度时取样，测定橄榄石和单斜辉石中Ni的浓度，并计算了Ni的分配系数，将测得的一组数据用lnKD对1/T作图，由图求出ΔH和B值。



三、岩浆作用过程中微量元素的定量分配模型

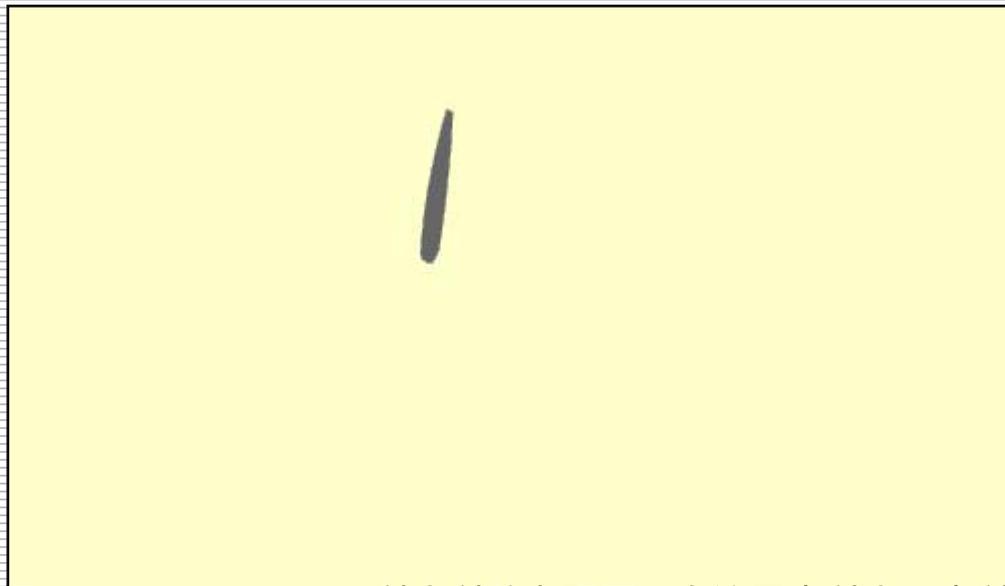
- 岩浆结晶分异作用模型
- 岩石形成岩浆的部分熔融模型



(一) 岩浆结晶分异作用模型

1. 结晶矿物与熔体只是表面平衡：

原因：是微量元素在晶体中的扩散要比在熔体中慢得多，使得微量元素在晶体边缘和晶体核部的分布不均一，导致晶体边缘与熔体能达到平衡，而晶体内部则不能与熔体平衡，形成的晶体具环带状构造。



定量模型（瑞利分馏定律）：

$$X_{\text{Tr(熔体)}} = X_{\text{Tr(熔体)}^0} \times F^{(K_D-1)}$$

$X_{\text{Tr(熔体)}}$ 是分异岩浆中矿物结晶时的熔体瞬间浓度， $X_{\text{Tr(熔体)}^0}$ 是原始熔体中的浓度， F 为残留熔体与原始熔体的百分数，反映岩浆结晶程度， $F=1$ 刚开始结晶， $F=0$ 完全结晶， K_D 为微量元素在晶体与熔体间的分配系数。

意义：利用模型可以分析元素在岩浆不平衡结晶过程中的地球化学行为，在此基础上对不相容元素作进一步讨论。

不相容元素常常具过大或过小的离子半径或离子电荷，他们对自然作用过程中的示踪意义——



大离子亲石元素 (large ion lithophile element) : 如K、Rb、Cs、Sr、Ba等，他们的离子半径大，离子电荷低，离子电位 <3 ，易溶于水，化学性质活泼，地球化学活动性强，可以作为地壳演化及地质作用发生的示踪剂；

高场强元素 (high field strength element) : 如Nb、Ta、Zr、Hf、P、Th、HREE (重稀土) 等，他们的离子半径小，离子电荷高，离子电位 >3 ，难溶于水，化学性质稳定，为非活动性元素，可以作为“原始”物质组成的示踪剂。



2. 平衡结晶过程：

矿物与熔体连续再平衡：形成无环带晶体，用于描述平衡部分熔融的方程式也适用于该过程：

$$C_L^i/C_0^i = 1/[D^i(1-F)+F]$$

C_0^i 是微量元素i在初始固相母体物质中的浓度， C_L^i 是微量元素i在熔融后在熔体中的浓度F=0熔融开始，F=1熔融完全。



(二) 岩浆部分熔融作用模型——平衡部分 熔融

1 平衡部分熔融：岩浆形成最常见也是最可能的熔融模式。在整个部分熔融过程中，熔体与残留固体始终保持平衡，直到熔体离去，这种熔融又称批次熔融、平衡熔融或一次熔融。

2. 定量模型假设：为了推导微量元素在产生的熔体中的浓度与部分熔融程度的关系，需假定：在整个部分熔融过程中微量元素在固相和液相之间的总分配系数始终保持不变；整个熔融过程中残余固相中各矿物相对形成熔体的贡献比例保持不变，

3. 定量模型：如前所述

$$C_L^i / C_O^i = 1 / [D^i (1-F) + F]$$

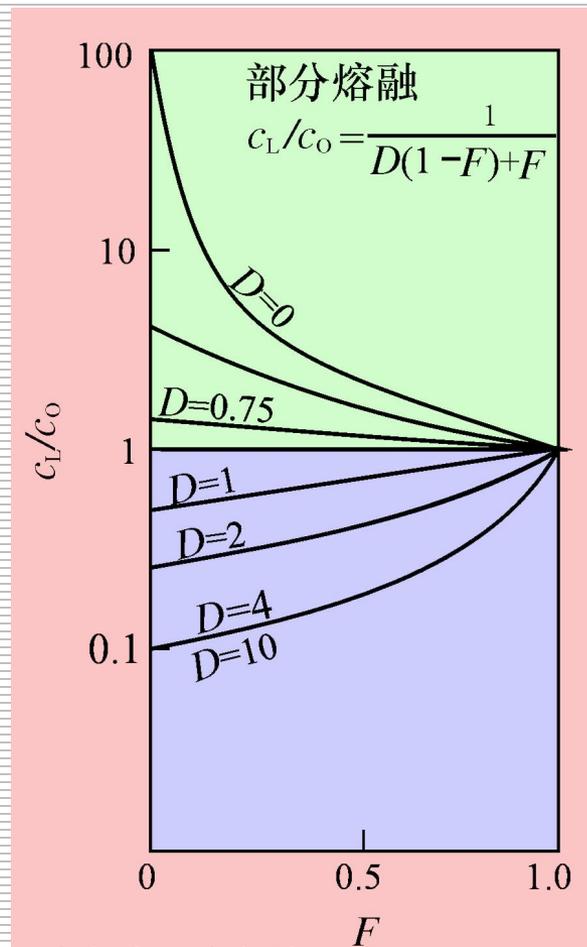


地球化学

4.讨论: 当 $F \rightarrow 0$ (部分熔融很小) $C_iL/C_{i0} \rightarrow 1/D_i$, 即微量元素在所形成的熔体中富集或贫化程度最大。随着 F 的增大, 则熔体中微量元素的富集和贫化程度逐渐减少。当岩石全部熔融, 即 $F \rightarrow 1$ 时, 熔体中元素的浓度与母岩中该元素的浓度趋于一致;

总分配系数 $D_i < 1$ 的不相容元素: 在形成的熔体中富集, 但其最大的富集浓度不能超出 $D_i=0$ 的曲线, 当 $D_i=0$, $C_iL/C_{i0}=1/F$, 这与岩浆结晶分异过程中的情况相同。

总分配系数 $D_i > 1$ 的相容元素: 在部分熔融形成的熔体中发生贫化, 但其贫化的速度随 F 的增大呈现出较缓慢的特征, 这与mdf uqi 结晶分异过程中, 随结晶程度增大(F 值减小)表现为在残余岩浆中浓度的急剧贫化有较显著的差别, 这种差别可以作为判别某个岩浆系列是岩浆结晶分异的产物, 还是由部分熔融所造成的标志。



四、稀土元素地球化学

地球化学

- 稀土元素的主要性质
- 稀土元素在地壳中的分配
- 稀土元素在自然界的分异
- 稀土元素数据的整理方法



地球化学

稀土元素地球化学在微量元素地球化学中占据很重要的地位，这是由稀土元素以下四个优点所决定的：

- 1.他们是性质极相似的地球化学元素组，在地质、地球化学作用过程中作为一个整体而活动—集体观念强；
- 2.他们的分馏作用能灵敏地反映地质、地球化学过程的性质—指示功能强；
- 3.稀土元素除受岩浆熔融作用外，其它地质作用基本上不破坏它的整体组成的稳定性—应变能力强；
- 4.他们在地壳岩石中分布较广—广泛性。

在目前测试技术水平大大提高的前提下（JA—1600电感耦合体发射光谱法测量精度可达 10^{-9} ），他们得以广泛应用。



地球化学

稀土元素在周期表中的位置

元素周期表

族	I A																II A										III A										IV A										V A										VI A										VII A										0										地壳含量	原子序数																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
1	1 H 氢 $1s^1$ 1.008																2 Li 锂 $2s^1$ 6.941										4 Be 铍 $2s^2$ 9.012										3 B 硼 $2s^2 2p^1$ 10.81										4 C 碳 $2s^2 2p^2$ 12.01										5 N 氮 $2s^2 2p^3$ 14.01										6 O 氧 $2s^2 2p^4$ 16.00										7 F 氟 $2s^2 2p^5$ 19.00										8 Ne 氖 $2s^2 2p^6$ 20.18										9 K 钾 $3s^1$ 39.10										20 Ca 钙 $3s^2 3p^6 4s^2$ 40.08										21 Sc 钪 $3d^1 4s^2$ 44.96										22 Ti 钛 $3d^2 4s^2$ 47.87										23 V 钒 $3d^3 4s^2$ 50.94										24 Cr 铬 $3d^5 4s^1$ 52.00										25 Mn 锰 $3d^5 4s^2$ 54.94										26 Fe 铁 $3d^6 4s^2$ 55.85										27 Co 钴 $3d^7 4s^2$ 58.93										28 Ni 镍 $3d^8 4s^2$ 58.69										29 Cu 铜 $3d^{10} 4s^1$ 63.55										30 Zn 锌 $3d^{10} 4s^2$ 65.39										31 Ga 镓 $3d^{10} 4s^2 4p^1$ 69.72										32 Ge 锗 $3d^{10} 4s^2 4p^2$ 72.61										33 As 砷 $3d^{10} 4s^2 4p^3$ 74.92										34 Se 硒 $3d^{10} 4s^2 4p^4$ 78.96										35 Br 溴 $3d^{10} 4s^2 4p^5$ 79.90										36 Kr 氩 $3d^{10} 4s^2 4p^6$ 83.80										37 Rb 铷 $4s^1$ 85.47										38 Sr 锶 $4s^2$ 87.62										39 Y 钇 $3d^1 4s^2 4p^6$ 88.91										40 Zr 锆 $3d^2 4s^2 4p^6$ 91.22										41 Nb 铌 $3d^4 4s^1 4p^6$ 92.91										42 Mo 钼 $3d^5 4s^1 4p^6$ 95.94										43 Tc 锝 $3d^5 4s^2 4p^6$ [98]										44 Ru 钌 $3d^7 4s^1 4p^6$ 101.1										45 Rh 铑 $3d^8 4s^1 4p^6$ 102.9										46 Pd 钯 $3d^{10} 4s^1 4p^6$ 106.4										47 Ag 银 $3d^{10} 4s^1 4p^6$ 107.9										48 Cd 镉 $3d^{10} 4s^2 4p^6$ 112.4										49 In 铟 $3d^{10} 4s^2 4p^6 5s^2$ 114.8										50 Sn 锡 $3d^{10} 4s^2 4p^6 5s^2$ 118.7										51 Sb 锑 $3d^{10} 4s^2 4p^6 5s^2 5p^3$ 121.8										52 Te 碲 $3d^{10} 4s^2 4p^6 5s^2 5p^4$ 127.6										53 I 碘 $3d^{10} 4s^2 4p^6 5s^2 5p^5$ 126.9										54 Xe 氙 $3d^{10} 4s^2 4p^6 5s^2 5p^6$ 131.3										55 Cs 铯 $5s^1$ 132.9										56 Ba 钡 $5s^2$ 137.2										57 La-Lu 镧系 镧系										72 Hf 铪 $4d^2 5s^2 5p^6$ 178.5										73 Ta 钽 $4d^3 5s^2 5p^6$ 180.9										74 W 钨 $4d^4 5s^2 5p^6$ 183.8										75 Re 铼 $4d^5 5s^2 5p^6$ 186.2										76 Os 锇 $4d^6 5s^2 5p^6$ 192.2										77 Ir 铱 $4d^7 5s^2 5p^6$ 192.2										78 Pt 铂 $4d^9 5s^1 5p^6$ 195.1										79 Au 金 $4d^{10} 5s^1 5p^6$ 197.0										80 Hg 汞 $4d^{10} 5s^2 5p^6$ 200.6										81 Tl 铊 $4d^{10} 5s^2 5p^6 6s^2$ 204.4										82 Pb 铅 $4d^{10} 5s^2 5p^6 6s^2 6p^2$ 207.2										83 Bi 铋 $4d^{10} 5s^2 5p^6 6s^2 6p^3$ 209.0										84 Po 钋 $4d^{10} 5s^2 5p^6 6s^2 6p^4$ [209]										85 At 砹 $4d^{10} 5s^2 5p^6 6s^2 6p^5$ [210]										86 Rn 氡 $4d^{10} 5s^2 5p^6 6s^2 6p^6$ [222]										87 Fr 钫 $7s^1$ [223]										88 Ra 镭 $7s^2$ 226.0										89-103 Ac-Lr 锕系 锕系										104 Rf 𨭎 $5d^4 6s^2 6p^6$ [261]										105 Ha 𨭉 $5d^5 6s^2 6p^6$ [262]										106 𨭊 $5d^6 6s^2 6p^6$ [263]										107 𨭋 $5d^7 6s^2 6p^6$ [264]										108 𨭌 $5d^8 6s^2 6p^6$ [265]										109 𨭍 $5d^9 6s^2 6p^6$ [266]																																																																															
2	3 Li 锂 $2s^1$ 6.941																4 Be 铍 $2s^2$ 9.012										5 B 硼 $2s^2 2p^1$ 10.81										6 C 碳 $2s^2 2p^2$ 12.01										7 N 氮 $2s^2 2p^3$ 14.01										8 O 氧 $2s^2 2p^4$ 16.00										9 F 氟 $2s^2 2p^5$ 19.00										10 Ne 氖 $2s^2 2p^6$ 20.18										11 Na 钠 $3s^1$ 22.99										12 Mg 镁 $3s^2$ 24.31										13 Al 铝 $3s^2 3p^1$ 26.98										14 Si 硅 $3s^2 3p^2$ 28.09										15 P 磷 $3s^2 3p^3$ 30.97										16 S 硫 $3s^2 3p^4$ 32.07										17 Cl 氯 $3s^2 3p^5$ 35.45										18 Ar 氩 $3s^2 3p^6$ 39.95										19 K 钾 $4s^1$ 39.10										20 Ca 钙 $4s^2$ 40.08										21 Sc 钪 $3d^1 4s^2$ 44.96										22 Ti 钛 $3d^2 4s^2$ 47.87										23 V 钒 $3d^3 4s^2$ 50.94										24 Cr 铬 $3d^5 4s^1$ 52.00										25 Mn 锰 $3d^5 4s^2$ 54.94										26 Fe 铁 $3d^6 4s^2$ 55.85										27 Co 钴 $3d^7 4s^2$ 58.93										28 Ni 镍 $3d^8 4s^2$ 58.69										29 Cu 铜 $3d^{10} 4s^1$ 63.55										30 Zn 锌 $3d^{10} 4s^2$ 65.39										31 Ga 镓 $3d^{10} 4s^2 4p^1$ 69.72										32 Ge 锗 $3d^{10} 4s^2 4p^2$ 72.61										33 As 砷 $3d^{10} 4s^2 4p^3$ 74.92										34 Se 硒 $3d^{10} 4s^2 4p^4$ 78.96										35 Br 溴 $3d^{10} 4s^2 4p^5$ 79.90										36 Kr 氩 $3d^{10} 4s^2 4p^6$ 83.80										37 Rb 铷 $5s^1$ 85.47										38 Sr 锶 $5s^2$ 87.62										39 Y 钇 $4d^1 5s^2 4p^6$ 88.91										40 Zr 锆 $4d^2 5s^2 4p^6$ 91.22										41 Nb 铌 $4d^4 5s^1 4p^6$ 92.91										42 Mo 钼 $4d^5 5s^1 4p^6$ 95.94										43 Tc 锝 $4d^5 5s^2 4p^6$ [98]										44 Ru 钌 $4d^7 5s^1 4p^6$ 101.1										45 Rh 铑 $4d^8 5s^1 4p^6$ 102.9										46 Pd 钯 $4d^{10} 5s^1 4p^6$ 106.4										47 Ag 银 $4d^{10} 5s^1 4p^6$ 107.9										48 Cd 镉 $4d^{10} 5s^2 4p^6$ 112.4										49 In 铟 $4d^{10} 5s^2 4p^6 5s^2$ 114.8										50 Sn 锡 $4d^{10} 5s^2 4p^6 5s^2$ 118.7										51 Sb 锑 $4d^{10} 5s^2 4p^6 5s^2 5p^3$ 121.8										52 Te 碲 $4d^{10} 5s^2 4p^6 5s^2 5p^4$ 127.6										53 I 碘 $4d^{10} 5s^2 4p^6 5s^2 5p^5$ 126.9										54 Xe 氙 $4d^{10} 5s^2 4p^6 5s^2 5p^6$ 131.3										55 Cs 铯 $6s^1$ 132.9										56 Ba 钡 $6s^2$ 137.2										57 La-Lu 镧系 镧系										72 Hf 铪 $5d^2 6s^2 5p^6$ 178.5										73 Ta 钽 $5d^3 6s^2 5p^6$ 180.9										74 W 钨 $5d^4 6s^2 5p^6$ 183.8										75 Re 铼 $5d^5 6s^2 5p^6$ 186.2										76 Os 锇 $5d^6 6s^2 5p^6$ 192.2										77 Ir 铱 $5d^7 6s^2 5p^6$ 192.2										78 Pt 铂 $5d^9 6s^1 5p^6$ 195.1										79 Au 金 $5d^{10} 6s^1 5p^6$ 197.0										80 Hg 汞 $5d^{10} 6s^2 5p^6$ 200.6										81 Tl 铊 $5d^{10} 6s^2 5p^6 6s^2$ 204.4										82 Pb 铅 $5d^{10} 6s^2 5p^6 6s^2 6p^2$ 207.2										83 Bi 铋 $5d^{10} 6s^2 5p^6 6s^2 6p^3$ 209.0										84 Po 钋 $5d^{10} 6s^2 5p^6 6s^2 6p^4$ [209]										85 At 砹 $5d^{10} 6s^2 5p^6 6s^2 6p^5$ [210]										86 Rn 氡 $5d^{10} 6s^2 5p^6 6s^2 6p^6$ [222]										87 Fr 钫 $7s^1$ [223]										88 Ra 镭 $7s^2$ 226.0										89-103 Ac-Lr 锕系 锕系										104 Rf 𨭎 $6d^4 7s^2 6p^6$ [261]										105 Ha 𨭉 $6d^5 7s^2 6p^6$ [262]										106 𨭊 $6d^6 7s^2 6p^6$ [263]										107 𨭋 $6d^7 7s^2 6p^6$ [264]										108 𨭌 $6d^8 7s^2 6p^6$ [265]										109 𨭍 $6d^9 7s^2 6p^6$ [266]									
3	11 Na 钠 $3s^1$ 22.99																12 Mg 镁 $3s^2$ 24.31										13 Al 铝 $3s^2 3p^1$ 26.98										14 Si 硅 $3s^2 3p^2$ 28.09										15 P 磷 $3s^2 3p^3$ 30.97										16 S 硫 $3s^2 3p^4$ 32.07										17 Cl 氯 $3s^2 3p^5$ 35.45										18 Ar 氩 $3s^2 3p^6$ 39.95										19 K 钾 $4s^1$ 39.10										20 Ca 钙 $4s^2$ 40.08										21 Sc 钪 $3d^1 4s^2$ 44.96										22 Ti 钛 $3d^2 4s^2$ 47.87										23 V 钒 $3d^3 4s^2$ 50.94										24 Cr 铬 $3d^5 4s^1$ 52.00										25 Mn 锰 $3d^5 4s^2$ 54.94										26 Fe 铁 $3d^6 4s^2$ 55.85										27 Co 钴 $3d^7 4s^2$ 58.93										28 Ni 镍 $3d^8 4s^2$ 58.69										29 Cu 铜 $3d^{10} 4s^1$ 63.55										30 Zn 锌 $3d^{10} 4s^2$ 65.39										31 Ga 镓 $3d^{10} 4s^2 4p^1$ 69.72										32 Ge 锗 $3d^{10} 4s^2 4p^2$ 72.61										33 As 砷 $3d^{10} 4s^2 4p^3$ 74.92										34 Se 硒 $3d^{10} 4s^2 4p^4$ 78.96										35 Br 溴 $3d^{10} 4s^2 4p^5$ 79.90										36 Kr 氩 $3d^{10} 4s^2 4p^6$ 83.80										37 Rb 铷 $5s^1$ 85.47										38 Sr 锶 $5s^2$ 87.62										39 Y 钇 $4d^1 5s^2 4p^6$ 88.91										40 Zr 锆 $4d^2 5s^2 4p^6$ 91.22										41 Nb 铌 $4d^4 5s^1 4p^6$ 92.91										42 Mo 钼 $4d^5 5s^1 4p^6$ 95.94										43 Tc 锝 $4d^5 5s^2 4p^6$ [98]										44 Ru 钌 $4d^7 5s^1 4p^6$ 101.1										45 Rh 铑 $4d^8 5s^1 4p^6$ 102.9										46 Pd 钯 $4d^{10} 5s^1 4p^6$ 106.4										47 Ag 银 $4d^{10} 5s^1 4p^6$ 107.9										48 Cd 镉 $4d^{10} 5s^2 4p^6$ 112.4										49 In 铟 $4d^{10} 5s^2 4p^6 5s^2$ 114.8										50 Sn 锡 $4d^{10} 5s^2 4p^6 5s^2$ 118.7										51 Sb 锑 $4d^{10} 5s^2 4p^6 5s^2 5p^3$ 121.8										52 Te 碲 $4d^{10} 5s^2 4p^6 5s^2 5p^4$ 127.6										53 I 碘 $4d^{10} 5s^2 4p^6 5s^2 5p^5$ 126.9										54 Xe 氙 $4d^{10} 5s^2 4p^6 5s^2 5p^6$ 131.3										55 Cs 铯 $6s^1$ 132.9										56 Ba 钡 $6s^2$ 137.2										57 La-Lu 镧系 镧系										72 Hf 铪 $5d^2 6s^2 5p^6$ 178.5										73 Ta 钽 $5d^3 6s^2 5p^6$ 180.9										74 W 钨 $5d^4 6s^2 5p^6$ 183.8										75 Re 铼 $5d^5 6s^2 5p^6$ 186.2										76 Os 锇 $5d^6 6s^2 5p^6$ 192.2										77 Ir 铱 $5d^7 6s^2 5p^6$ 192.2										78 Pt 铂 $5d^9 6s^1 5p^6$ 195.1										79 Au 金 $5d^{10} 6s^1 5p^6$ 197.0										80 Hg 汞 $5d^{10} 6s^2 5p^6$ 200.6										81 Tl 铊 $5d^{10} 6s^2 5p^6 6s^2$ 204.4										82 Pb 铅 $5d^{10} 6s^2 5p^6 6s^2 6p^2$ 207.2										83 Bi 铋 $5d^{10} 6s^2 5p^6 6s^2 6p^3$ 209.0										84 Po 钋 $5d^{10} 6s^2 5p^6 6s^2 6p^4$ [209]										85 At 砹 $5d^{10} 6s^2 5p^6 6s^2 6p^5$ [210]										86 Rn 氡 $5d^{10} 6s^2 5p^6 6s^2 6p^6$ [222]										87 Fr 钫 $7s^1$ [223]										88 Ra 镭 $7s^2$ 226.0										89-103 Ac-Lr 锕系 锕系										104 Rf 𨭎 $6d^4 7s^2 6p^6$ [261]										105 Ha 𨭉 $6d^5 7s^2 6p^6$ [262]										106 𨭊 $6d^6 7s^2 6p^6$ [263]										107 𨭋 $6d^7 7s^2 6p^6$ [264]										108 𨭌 $6d^8 7s^2 6p^6$ [265]										109 𨭍 $6d^9 7s^2 6p^6$ [266]																																																																																									
4	19 K 钾 $4s^1$ 39.10																20 Ca 钙 $4s^2$ 40.08										21 Sc 钪 $3d^1 4s^2$ 44.96										22 Ti 钛 $3d^2 4s^2$ 47.87										23 V 钒 $3d^3 4s^2$ 50.94										24 Cr 铬 $3d^5 4s^1$ 52.00										25 Mn 锰 $3d^5 4s^2$ 54.94										26 Fe 铁 $3d^6 4s^2$ 55.85										27 Co 钴 $3d^7 4s^2$ 58.93										28 Ni 镍 $3d^8 4s^2$ 58.69										29 Cu 铜 $3d^{10} 4s^1$ 63.55										30 Zn 锌 $3d^{10} 4s^2$ 65.39										31 Ga 镓 $3d^{10} 4s^2 4p^1$ 69.72										32 Ge 锗 $3d^{10} 4s^2 4p^2$ 72.61										33 As 砷 $3d^{10} 4s^2 4p^3$ 74.92										34 Se 硒 $3d^{10} 4s^2 4p^4$ 78.96										35 Br 溴 $3d^{10} 4s^2 4p^5$ 79.90										36 Kr 氩 $3d^{10} 4s^2 4p^6$ 83.80										37 Rb 铷 $5s^1$ 85.47										38 Sr 锶 $5s^2$ 87.62										39 Y 钇 $4d^1 5s^2 4p^6$ 88.91										40 Zr 锆 $4d^2 5s^2 4p^6$ 91.22										41 Nb 铌 $4d^4 5s^1 4p^6$ 92.91										42 Mo 钼 $4d^5 5s^1 4p^6$ 95.94										43 Tc 锝 $4d^5 5s^2 4p^6$ [98]										44 Ru 钌 $4d^7 5s^1 4p^6$ 101.1										45 Rh 铑 $4d^8 5s^1 4p^6$ 102.9										46 Pd 钯 $4d^{10} 5s^1 4p^6$ 106.4										47 Ag 银 $4d^{10} 5s^1 4p^6$ 107.9										48 Cd 镉 $4d^{10} 5s^2 4p^6$ 112.4										49 In 铟 $4d^{10} 5s^2 4p^6 5s^2$ 114.8										50 Sn 锡 $4d^{10} 5s^2 4p^6 5s^2$ 118.7										51 Sb 锑 $4d^{10} 5s^2 4p^6 5s^2 5p^3$ 121.8										52 Te 碲 $4d^{10} 5s^2 4p^6 5s^2 5p^4$ 127.6										53 I 碘 $4d^{10} 5s^2 4p^6 5s^2 5p^5$ 126.9										54 Xe 氙 $4d^{10} 5s^2 4p^6 5s^2 5p^6$ 131.3										55 Cs 铯 $6s^1$ 132.9										56 Ba 钡 $6s^2$ 137.2										57 La-Lu 镧系 镧系										72 Hf 铪 $5d^2 6s^2 5p^6$ 178.5										73 Ta 钽 $5d^3 6s^2 5p^6$ 180.9										74 W 钨 $5d^4 6s^2 5p^6$ 183.8										75 Re 铼 $5d^5 6s^2 5p^6$ 186.2										76 Os 锇 $5d^6 6s^2 5p^6$ 192.2										77 Ir 铱 $5d^7 6s^2 5p^6$ 192.2										78 Pt 铂 $5d^9 6s^1 5p^6$ 195.1										79 Au 金 $5d^{10} 6s^1 5p^6$ 197.0										80 Hg 汞 $5d^{10} 6s^2 5p^6$ 200.6										81 Tl 铊 $5d^{10} 6s^2 5p^6 6s^2$ 204.4										82 Pb 铅 $5d^{10} 6s^2 5p^6 6s^2 6p^2$ 207.2										83 Bi 铋 $5d^{10} 6s^2 5p^6 6s^2 6p^3$ 209.0										84 Po 钋 $5d^{10} 6s^2 5p^6 6s^2 6p^4$ [209]										85 At 砹 $5d^{10} 6s^2 5p^6 6s^2 6p^5$ [210]										86 Rn 氡 $5d^{10} 6s^2 5p^6 6s^2 6p^6$ [222]										87 Fr 钫 $7s^1$ [223]										88 Ra 镭 $7s^2$ 226.0										89-103 Ac-Lr 锕系 锕系										104 Rf 𨭎 $6d^4 7s^2 6p^6$ [261]										105 Ha 𨭉 $6d^5 7s^2 6p^6$ [262]										106 𨭊 $6d^6 7s^2 6p^6$ [263]										107 𨭋 $6d^7 7s^2 6p^6$ [264]										108 𨭌 $6d^8 7s^2 6p^6$ [265]										109 𨭍 $6d^9 7s^2 6p^6$ [266]																																																																																																																																																																									

(一) 稀土元素的主要性质

1. 什么是稀土元素

以往由于分析技术水平低，误认为他们在地壳中很稀少，另外它们一般发现于富集的风化壳上，呈土状，故名稀土。实际上稀土并不稀，REE（稀土元素）的地壳丰度为0.017%，其中Ce、La、Nd的丰度比W、Sn、Mo、Pb、Co还高。中国是稀土大国，我国的稀土矿尤为丰富。

我国内蒙白云鄂博稀土矿



2. 稀土分类（两分法和三分法）

^{57}La ^{58}Ce $^{59}\text{Pr}^*$ ^{60}Nd ^{61}Pm ^{62}Sm ^{63}Eu ^{64}Gd ^{65}Tb ^{66}Dy ^{67}Ho ^{68}Er ^{69}Tm ^{70}Yb ^{71}Lu ^{39}Y

镧 铈 镨 钕 钐 铕 钆 铽 镱 镱 铟 铪 铋 铈 铉 铊

*镨具有放射性



ΣCe 族稀土:La—Eu 轻稀土(LREE)

ΣY 族稀土:Gd—Y 重稀土(HREE)



轻稀土:La—Nd

中稀土:Sm—Ho

重稀土:Er—Lu+Y



3. 稀土元素的主要性质

★ 稀土元素属新增电子充填在4f亚层的“4f型元素”：4f亚层电子因受5s²和5p⁶亚层中8个电子的屏蔽，很少参与化学反应，故这15个元素的化学性质相似，在自然界密切共生，成组进入矿物晶格；

★ 在化学反应中的电子转移：稀土元素原子易失去6s²5d¹或6s²4f¹三个电子，故均呈三价产出；

★ Y元素：是第5周期过渡元素的起点，次外层d型充填，外电子排布为5s²4d¹，与稀土元素性质相似，也呈三价阳离子存在；

★ 稀土元素中最稳定的三个元素：La (f⁰) —代表轻稀土，Eu (f⁷) 和Lu (f¹⁴) —代表重稀土；



地球化学

★ 稀土元素中的变价元素：Eu、Yb有+2价（Eu²⁺具稳定的半充满4f⁷亚层，Yb²⁺具稳定的全充满4f¹⁴亚层），Ce、Tb有+4价（Ce⁴⁺具稳定的Xe电子构型，Tb⁴⁺具稳定的半充满4f⁷亚层）。在自然体系中，确有Eu²⁺和Ce⁴⁺存在，但Yb²⁺的存在需极还原的条件，一般在地壳条件下不存在，Tb⁴⁺尚未发现；

$\text{Eu}^{3+} + e \rightarrow \text{Eu}^{2+}$, $E_{h_0} = -0.43\text{v}$: 由于Eu²⁺与Ca²⁺晶体化学性质相似，往往可以使Eu²⁺脱离REE³⁺整体而单独活动，这样在岩浆早期富Ca²⁺的环境中，斜长石一般含较高的Eu²⁺，形成斜长石的“正铈异常”；

$\text{Ce}^{3+} \rightarrow \text{Ce}^{4+} + e$, $E_{h_0} = 1.61\text{v}$: 在强氧化条件下，Ce⁴⁺与REE³⁺整体脱离，形成所谓的“负铈异常”；

★ 络合物是稀土元素的主要迁移形式：稀土元素离子电位居中，在碱性条件下易形成络阴离子。稀土元素的碳酸盐、硫酸盐、氟化物的络合物易溶于水而进行迁移，如Na₃[REEF₆]，Na₃[REE(CO₃)₃]，Na₃[REE(SO₄)₃]等。



(二) 稀土元素在地壳中的分配

1. 超基性岩→基性岩→中性岩→酸性岩→碱性岩

ΣREE 是逐渐增加的；稀土元素在自然界的分异稀土元素在地壳中的分配从地幔到地壳： ΣREE 增加了20多倍， $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$ 增加了三倍多；

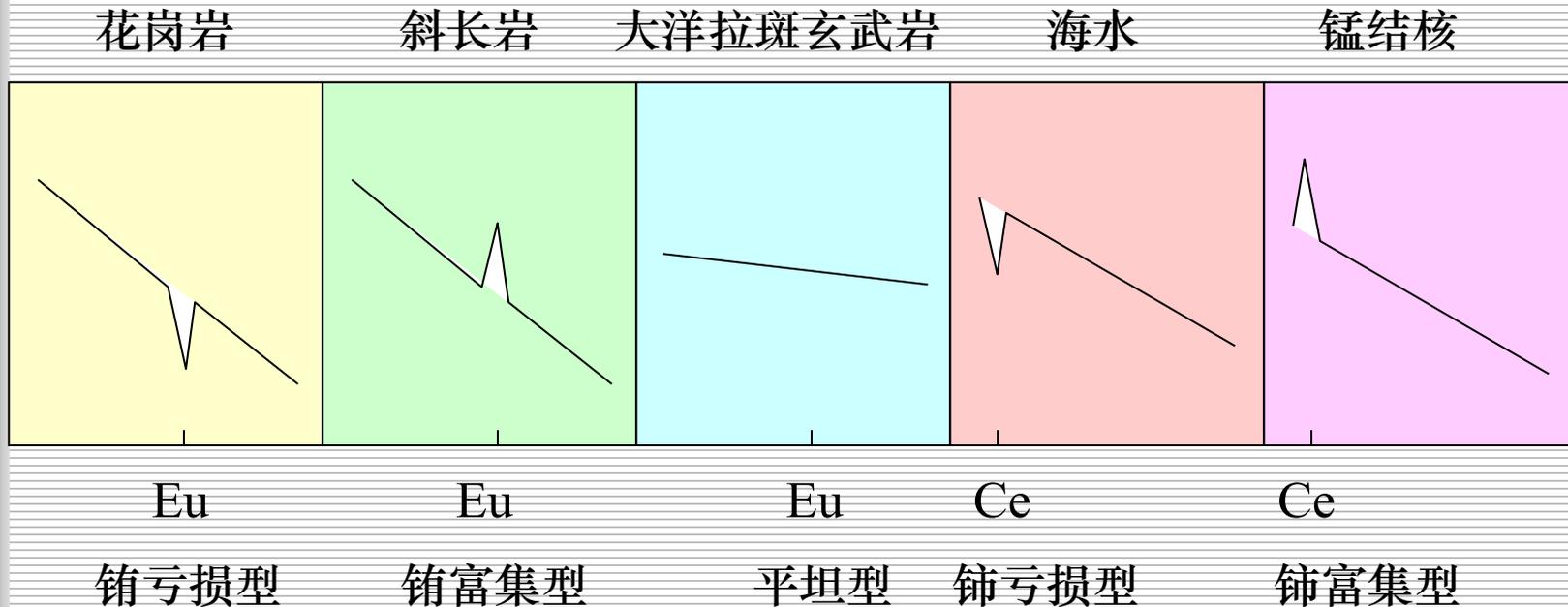
地幔、超基性岩、基性岩中 ΣY 占优势，随着分异，陆壳及酸性岩、碱性岩以 ΣCe 占优势；

2. 15个稀土元素在地壳中

明显呈现出偶数元素高于相邻奇数元素的丰度（奇偶效应）的现象，为了便于对比研究，需消除奇偶效应，数据需进行标准化处理，即将岩石、矿物中某稀土元素含量除以球粒陨石的含量，例如 $\text{La玄武岩}/\text{La球粒陨石} = 7.28/0.32 = 22.75$ ；



3.地壳中各类岩石稀土元素相对丰度曲线，根据Eu和Ce的分布可分为五种类型



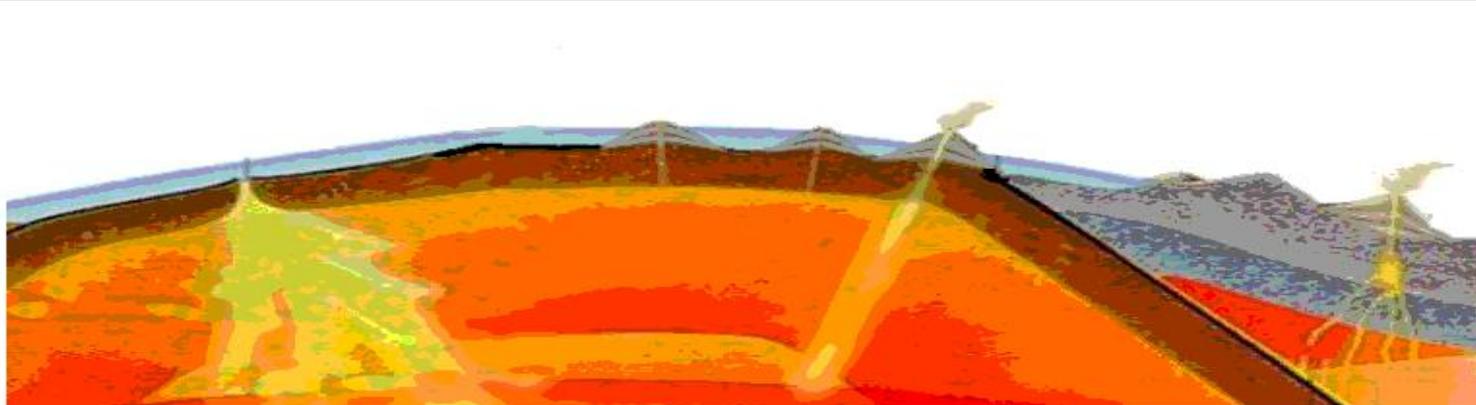
按 Σ LREE和 Σ HREE的含量比例不同，又可以分为：

右倾型： Σ LREE $>$ Σ HREE；平缓型： Σ LREE \approx Σ HREE；左倾型： Σ LREE $<$ Σ HREE三种。



4. 各类地质体对稀土含量及配分模式控制的差

如不同构造环境的玄武岩：大洋拉斑玄武岩→高铝玄武岩→大陆拉斑玄武岩。



(三) 稀土元素在自然界的分异

1. 溶液酸碱性的控制

虽然稀土元素性质相似，但是从La到Lu，离子半径不断减小，离子电位($\pi=W/R$)不断增大，碱性减弱，氢氧化物溶解度减小。因此开始沉淀时溶液的pH值由8→6，并产生下列的分异：稀土元素在地壳中的分配 碱性岩：La、Ce、Pr、Nd等和Sr、Ba、Ca、K共生，碱性花岗岩：相对富集Sm、Gd、Tb、Dy，钙碱性花岗岩：以Y、Ho、Er、Tm、Lu等重稀土，与Sc、Mn等元素共生。

2. 氧化还原条件控制

某些稀土元素的变价性，对外界氧化还原条件变化反应敏感：
 $Ce^{3+} \rightarrow Ce^{4+}$ ：离子半径 $R1.07\text{\AA} \rightarrow 0.94\text{\AA}$ ， $Eu^{3+} \rightarrow Eu^{2+}$ ： $R0.98\text{\AA} \rightarrow 1.24\text{\AA}$ ，由于离子价态变化，导致半径和酸碱性的变化，致使与 REE^{3+} 整体分离。



3. 络离子稳定性的差异: 稀土元素在自然界的分异

REE可与 F^- 、 Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 等形成络阴离子，但不同元素稳定性各异， ΣY 络离子稳定性 $>$ ΣCe 络离子稳定性，这样 ΣCe 矿物沉淀后， ΣY 元素尚可呈络合物形式在溶液中迁移，在较晚的阶段沉淀，导致 ΣCe 与 ΣY 的分异。

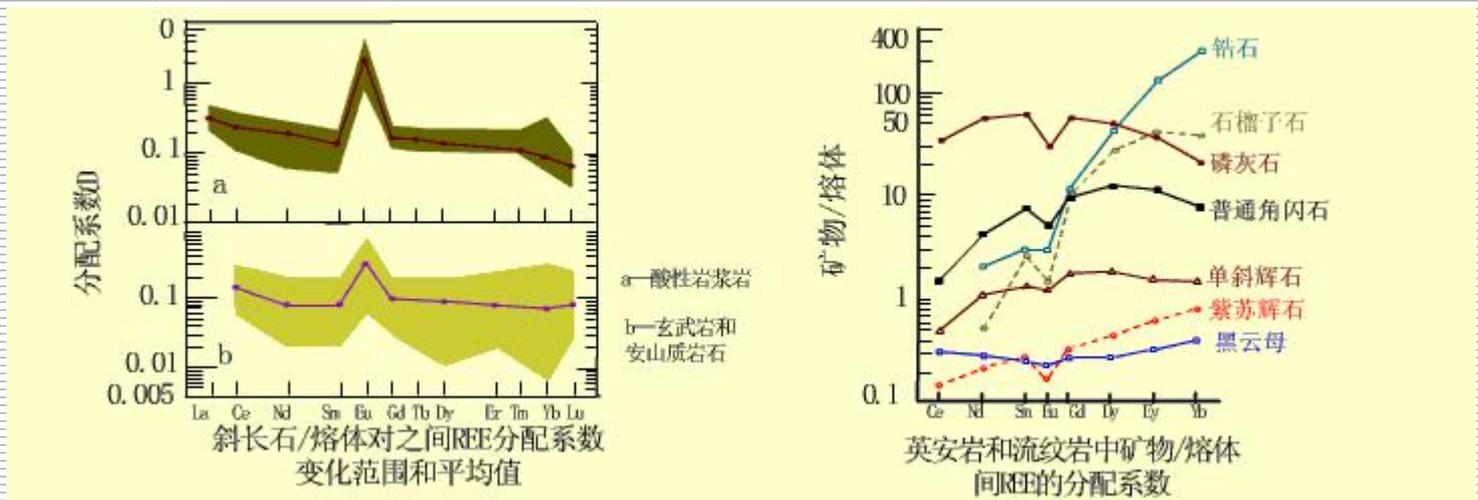
4. 被吸附能力的差异

ΣCe 被胶体、有机质和粘土矿物吸附能力大于 ΣY 。



5. 结晶矿物和熔体中的分异

岩石中稀土元素主要赋存在副矿物中，分配系数是采用火山岩中斑晶/基质法进行测定。由图可见：不同矿物中稀土元素的含量有着明显的不同；同一矿物中轻重稀土元素的含量有一定的差异；元素Eu在图中所涉及的矿物里相对亏损；除Eu以外，不同稀土元素对同种矿物的分配系数比较接近，而Eu则明显偏大。



(四) 稀土元素数据的整理方法

1. 稀土总量和轻重稀土比值

稀土元素在自然界的分异 稀土总量： ΣREE ；稀土元素在地壳中的分配 轻重稀土比值： $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$ ， La/Yb ， La/Lu ；

2. 某些特殊元素比值 (δEu ， δCe)

负铕指数 δEu ，用来指示铕异常的大小：

$$\delta_{\text{Eu}} = \frac{(\text{Eu}_{\text{岩}}/\text{Eu}_{\text{球}})}{\frac{1}{2}[(\text{Sm}_{\text{岩}}/\text{Sm}_{\text{球}})+(\text{Gd}_{\text{岩}}/\text{Gd}_{\text{球}})]}$$



地球化学

Eu/Eu^* . 由于 Eu^{2+} 常常部分呈 Eu^{2+} 离子产出，故地质体中 Eu^{2+} 经常发生与其它三价REE离子的分离。这造成在REE球粒陨石标准化丰度图解中在铕的位置上有时出现“峰”（Eu的过剩）和“谷”（Eu的亏损）。



3. 曾田彰正—科里尔图解

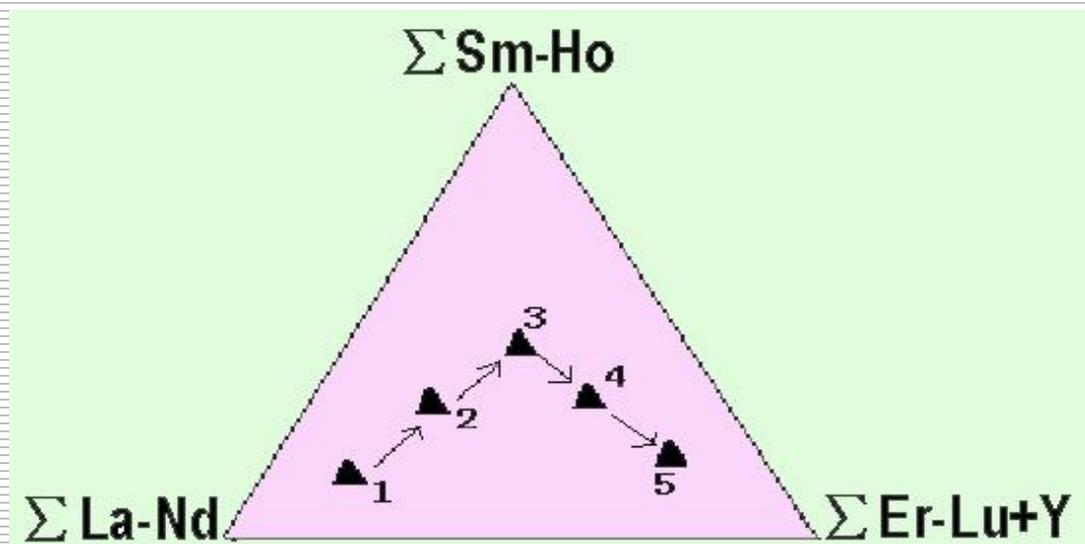
样品中每种稀土元素浓度除以参照物质(常为球粒陨石)中各稀土元素浓度, 得到标准化丰度。有人将研究体系的一部分作为参考物质作标准化图解。例如, 各种不同构造环境的玄武岩用大洋拉斑玄武岩作为参考物质, 它能较清楚显示出不同玄武岩稀土彼此分异的程度和数量;

4. 稀土配分三角图解

a. 把总量做分母, 每个分量做分子, 乘100%, 算出各元素在总量中所占百分数;

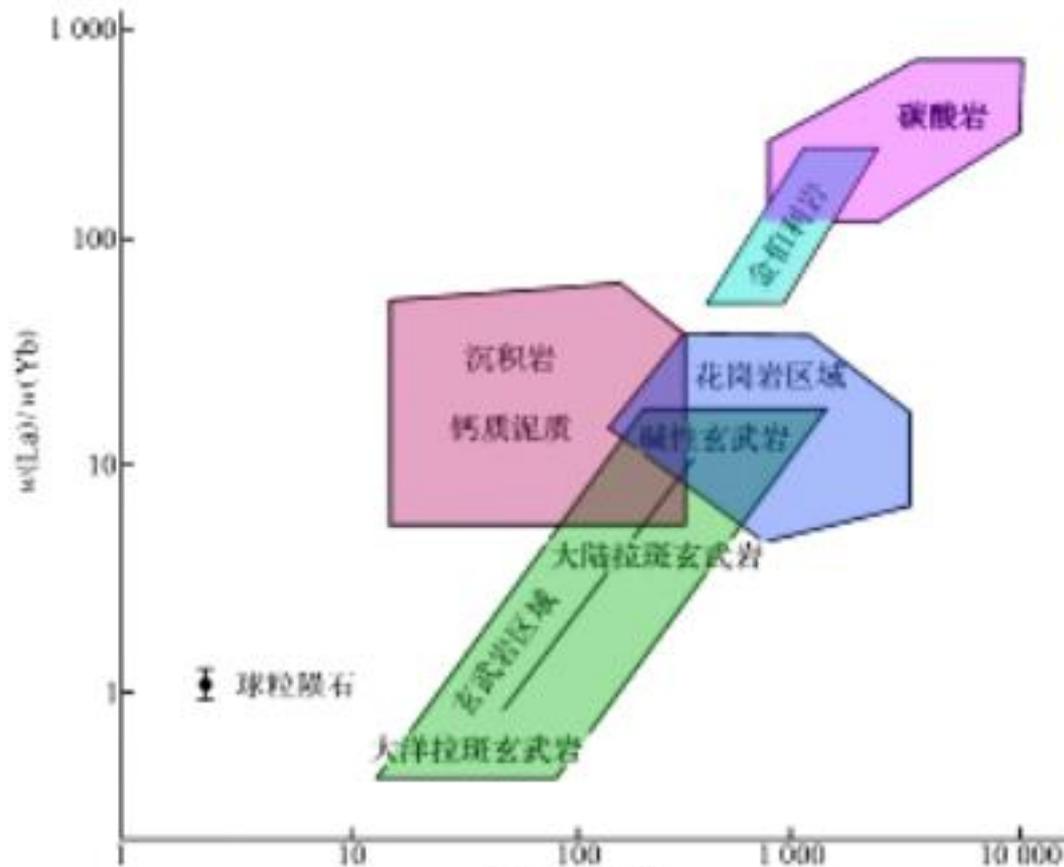
b. 把各分量分成轻、中、重三部分作三角图解;

c. 把各样品投在三角图解, 分析岩石(矿物)轻、中、重稀土时空变化趋势。



5. 稀土参数图解

这类图解很多，可用于探讨岩石形成机理或成因分类。如 $W(\text{La})/W(\text{Yb})-W(\text{REE})$ 图解，用以区分不同类型的玄武岩、花岗岩和碳酸盐岩。



五、微量元素的示踪意义

在现代分析和计算机技术的强劲支持下，近二十年来微量元素地球化学理论迅速发展，开辟了地球化学研究向定量、动态过程方向发展的新途径。

微量元素在地球系统中不是独立存在的，他们与各种地球物质的地质过程相联系。微量元素参与各种地球化学作用，作用过程中体系物理化学状态的转变，作用物质的质量迁移，能量的输运与动量的传递等，必然在微量元素组成上打上作用随时间演化的烙印。为此，通过观察、捕捉微量元素提供的地球化学作用的时空信息，可用来解释各种复杂的地质作用的原因和条件，追踪作用演化历史，使为地球科学基础理论的发展，为人类提供充足资源和良好生存环境等作出贡献成为可能。

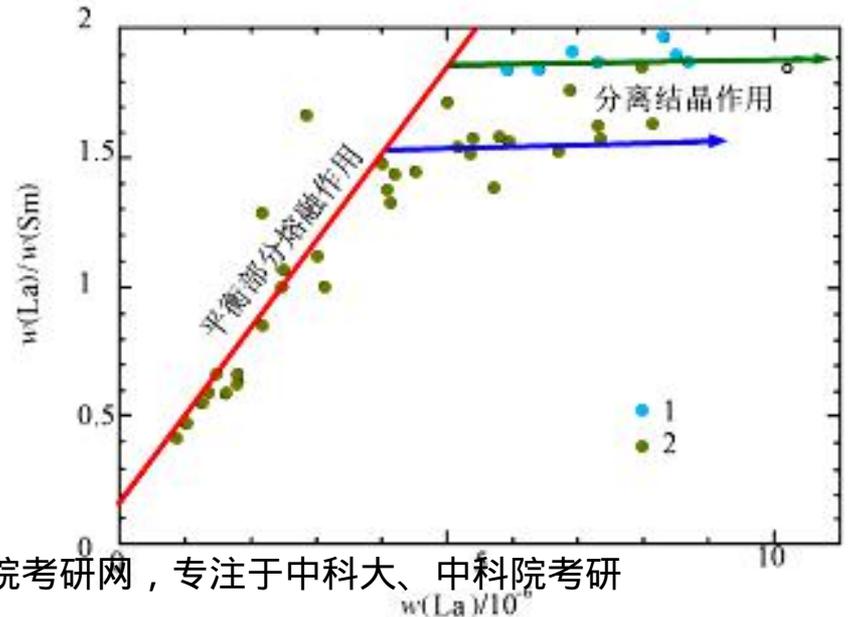


(一) 岩浆成岩过程的鉴别

根据平衡部分熔融和分离结晶作用中微量元素分配的定量模型，可以对成岩过程进行鉴别。Allegre 等人 (1978) 提出了判别部分熔融和分离结晶的方法。他们认为：

◆ **固-液相分配系数高的相容元素**：如Ni, Cr等，在分离结晶作用过程中它们的浓度变化很大，但在部分熔融过程中则变化缓慢；

◆ **固-液相分配系数低的微量元素**：如Ta、Th、La、Ce等（称为超岩浆元素），它们总分配系数很低，近于0，与0.2~0.5比较可忽略不计。在部分熔融过程中这些元素浓度变化大，但在分离结晶作用过程中则变化缓慢；



◆ **固—液相分配系数中等的微量元素**：如HREE、Zr、Hf等（称亲岩浆元素），它们的总分配系数与1比较可忽略不计。为此：

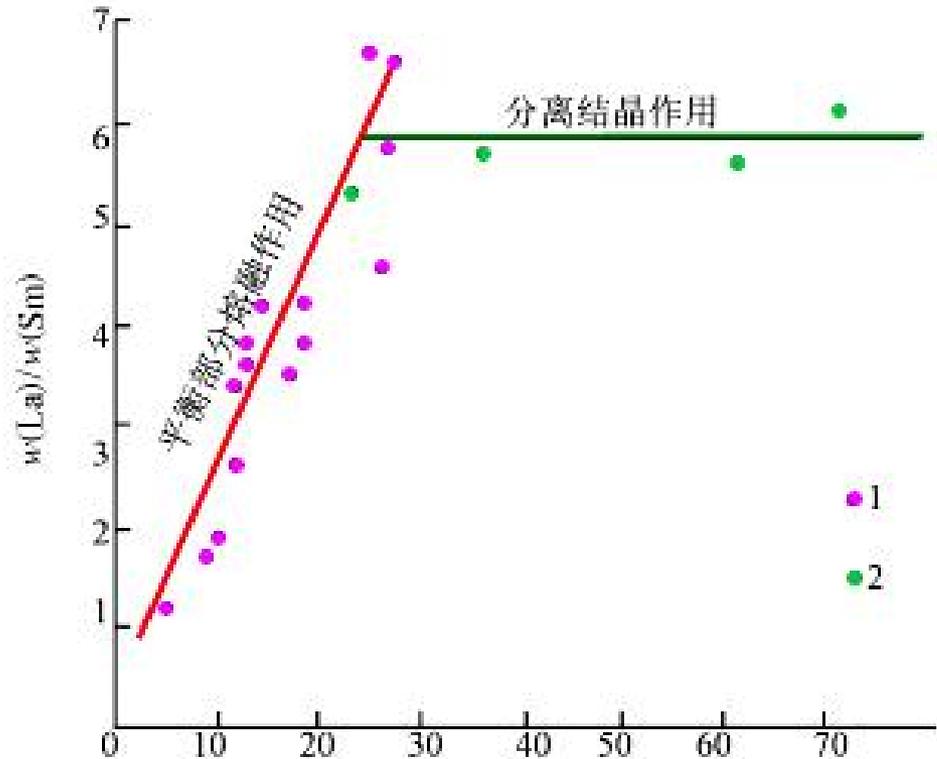
对于平衡部分熔融： $C_L^H = C_{O,s}^H / F$ 和 $C_L^M = C_{O,s}^M / (D_{O,s}^M + F)$ ，式中 C_L^H 为超岩浆元素在液相中的浓度， C_L^M 为亲岩浆元素在液相中的浓度； $C_{O,s}^H$ 和 $C_{O,s}^M$ 分别为它们在原始固相中的浓度；对于分离结晶作用： $C_L^H = C_{O,1}^H / F$ 、 $C_L^M = C_{O,1}^M / F$ 、 $C_L^H / C_L^M = C_{O,1}^H / C_{O,1}^M = \text{常数}$ 。

因此，当用 C_L^H / C_L^M 对 C_L^H 作图时，即用某超岩浆元素（H）与亲岩浆元素（M）浓度比值对超岩浆元素浓度作图时，平衡部分熔融的轨迹为一条斜率为 $D_{O,s}^M / C_{O,s}^M$ 的直线，因为H元素的 $D_{O,s}^H$ 可以忽略不计，而M元素 $D_{O,s}^M$ 值就不能不予考虑；而分离结晶作用的轨迹则构成一条水平线。



地球化学

如赵振华（1982）通过研究获知：我国西藏冈底斯花岗岩的斑状黑云母花岗岩主要通过分异结晶形成，而闪长岩、花岗闪长岩和二云母花岗岩属于平衡部分熔融的产物。 图中1为西藏冈底斯岩带燕山晚期花岗岩类,2为冈底斯岩带斑状黑云母花岗岩。



(二) 各类玄武岩对构造环境的鉴别

Pearce等(1982)根据构造环境与各类玄武岩之间的时空关系,将玄武岩划分为三种主要类型,并以标准洋脊玄武岩为基准对他们的微量元素成分进行作图:

◆ 在板块边缘深海环境下喷发的洋中脊玄武岩(MORB): 拉斑质玄武岩曲线呈平坦型,碱性玄武岩在Rb、Ba、Th、Ta、Nb处局部隆起,其后的元素与拉斑质玄武岩一致;快速扩张的洋中脊玄武岩与MORB的比值大于1,缓慢扩张的洋中脊玄武岩则小于1;

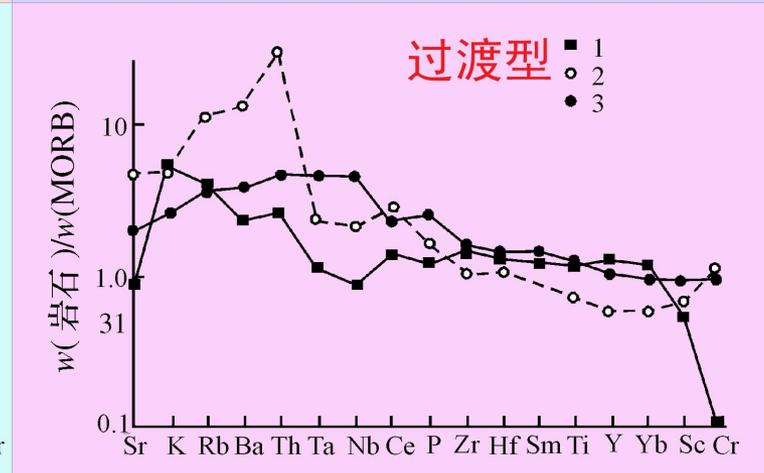
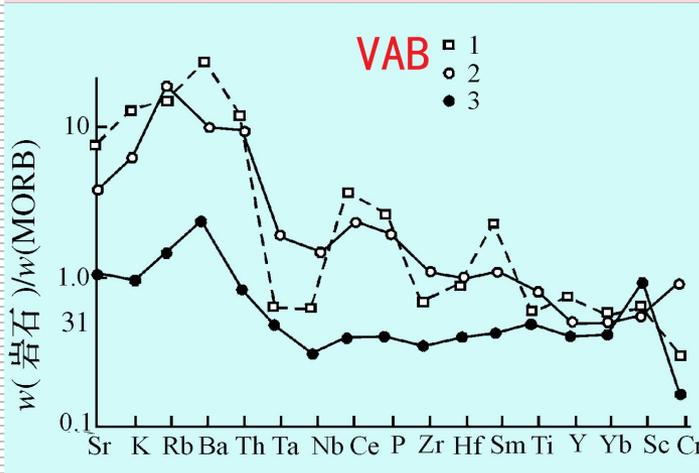
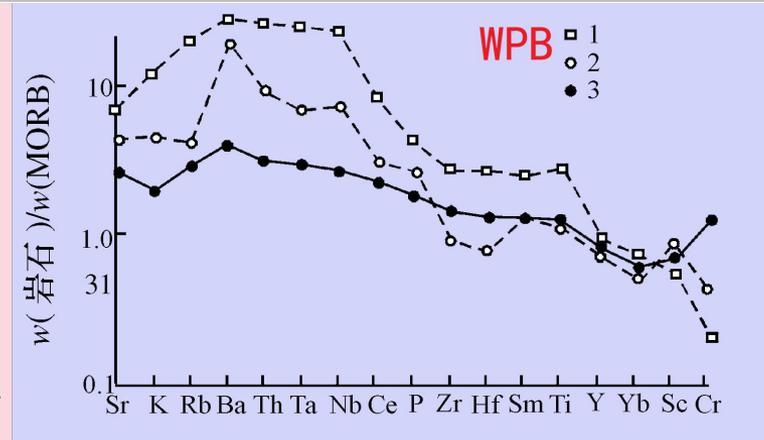
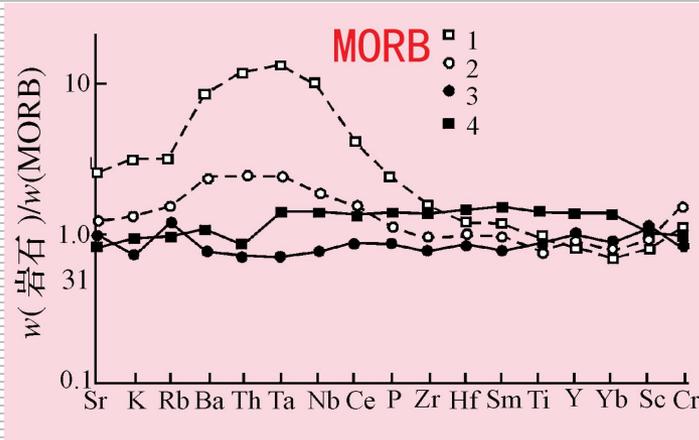
◆ 远离板块边缘喷发的板内玄武岩(WPB): 拉斑质玄武岩除Y、Yb、Sc、Cr等元素外,其他元素均呈隆起;碱性玄武岩中Ba、Th、Ta、Nb和Hf、Zr、Sm两组元素呈双隆起的曲线形式;

◆ 在汇聚板块边缘喷发的火山弧玄武岩(VAB): 拉斑质玄武岩除Sr、K、Rb、Ba为选择性富集外,从Ta到Yb所有元素以低丰度为特征;碱性玄武岩中Sr、K、Rb、Ba、Th等元素有较强富集和Ce、P、Sm等元素富集,呈现峰谷迭起的曲线形式;

◆ 过渡型玄武岩兼有相应端元组分特征。



地球化学



MORB: 1.碱性的; 2.拉斑--碱性的; 3.拉斑质缓慢扩张洋脊; 4.拉斑质快速扩张洋脊

WPB: 1.碱性的; 2.拉斑--碱性的; 3.拉斑质

VAB: 1.碱性的; 2.钙碱性的; 3.拉斑质

过渡型: 1.钙碱性--碱性的; 2.拉斑质 (MORB—WPB); 3.拉斑质 (MORB--VAB)



(三) 稀土元素探讨地壳的演化

W.B.Nance和S.R.Taylor等人系统研究了澳大利亚从太古代→元古代→三迭纪的沉积岩(页岩)的稀土组成及演化特征，并与世界其它地区作了对比，根据稀土组成模式的特点探讨了地壳成分及其演化：

◆ **首先，他们发现太古代与太古代以后的沉积岩稀土组成模式明显不同：**太古代的稀土元素丰度较低，Eu无亏损， $\Sigma Ce/\Sigma Y < 9.7$ ；太古代以后的稀土元素丰度较高，具负Eu异常， δEu 较稳定($\delta Eu = 0.67 \pm 0.05$)， $\Sigma Ce/\Sigma Y$ 较恒定为 9.7 ± 1.8 ，稀土组成模式相互平行；

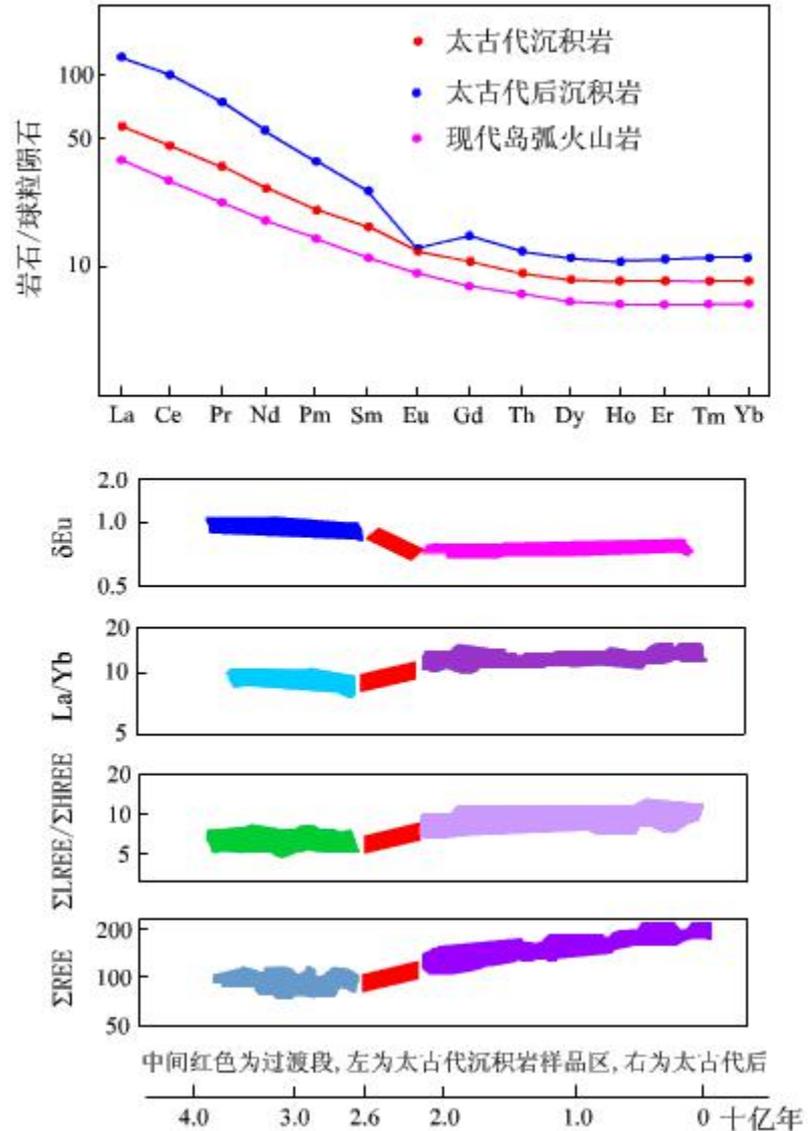
◆ **由此推测：**太古代地壳成分应与安山岩或英云闪长岩类似；太古代以后地壳成分相当于花岗闪长岩。



地球化学

◆ 根据以上认识对地壳成分演化建立以下模型：太古代整个地壳成分相当于现代岛弧环境下的火山岩和侵入岩。在演化过程中由于地壳内部的部分熔融而形成花岗闪长岩浆，这种岩浆的侵入，结晶形成了上地壳，而残留下的部分，形成相对贫亲石元素而富 Eu^{2+} ，贫轻稀土的下地壳。

综上所述，可以得出地壳稀土成分随时间演化的特征：在地壳演化过程中，26亿为太古界和元古界的界限，稀土元素组成特征有一个明显的突变，即稀土总量增加，轻稀土富集，铈亏损明显。



小结

自然系统和微量元素的特性决定了微量元素在地球及其子系统
中的分布分配、化学作用及化学演化特征。由于引进了伯塞洛--
能斯特分配定律，微量元素地球化学研究已从定性向近似定量、
从微观向宏观方向发展，因而有可能建立各种地球化学作用过程
元素演化的定量理论模型。

本章从微量元素在自然作用过程中的分配规律出发，重点讨论
了岩浆作用过程中微量元素演化的定量模型和稀土元素的地球化
学行为，在此基础上讨论了微量元素在地球化学研究中的应用。



思考题

1. 微量元素概念
2. 能斯特分配定律与分配系数
3. 元素在共存相中分配系数的确定方法
4. 总分配系数概念
5. 相容元素与不相容元素概念
6. 微量元素地质温度计的原理与方法
7. 元素在共存相中分配定律的地球化学意义
8. 在岩浆分异结晶过程中元素分配的定量模型、特征及地球化学应用



思考题

9. 在部分熔融过程中元素分配的定量模型、特征及地球化学应用
10. 岩浆结晶过程和部分熔融过程的判别方法
11. 稀土元素的基本地球化学性质
12. 稀土元素的数据处理方法及有关参数的计算方法
13. 岩石中稀土元素的组成模式类型
14. 稀土元素对岩石成因的指示意义
15. 变质原岩恢复的地球化学方法
16. 太古代后太古代沉积岩稀土元素地球化学特征
17. 微量元素对岩石形成构造环境的判别及其应注意的问题

