

峨眉山玄武岩和白马层状岩体的 铬镍地球化学

王旺章 汪云亮

(成都地质学院, 成都)

提 要: 文章讨论了峨眉山玄武岩及白马基性、超基性岩体的微量元素地球化学特征。对 Cr、Ni 富集的地球化学条件进行了探讨, 认为在母岩浆分离结晶早期形成的堆积层, 即结晶度很小的橄榄岩有利于寻找富 Cr、Ni 层位。

主题词: 堆积层 分离结晶 结晶度 憎岩浆元素

白马层状岩体与峨眉山玄武岩是同源岩浆的产物, 这种原始岩浆是临界面(氧化硅不饱和面)玄武岩浆, 主要为橄榄拉长玄武岩浆^[1]。在峨眉玄武岩原始岩浆的分离结晶作用过程中, 结晶相演化路线为橄榄岩—橄长岩—辉长岩; 分离结晶时岩浆保持在临界面上, 岩浆由橄榄拉长玄武岩浆→橄榄中长玄武岩浆→橄榄更长玄武岩浆, 最终向粗面岩浆演化。

形成白马-基格拉培德型辉长岩的岩浆, 为上述第二阶段的橄榄玄武岩浆, 是幔源原始玄武岩浆在形成橄长岩成分堆积晶以后的残余岩浆。也就是说, 峨眉玄武岩原始岩浆到达四相(岩浆、斜长石、橄榄石、透辉石)条件时, 演化为橄榄更长石-中长石玄武岩岩浆, 岩浆中计算的斜长石成分中钙长石分子约为32%。

峨眉山玄武岩原始岩浆, 既不是拉斑玄武岩浆, 也不是碱性玄武岩浆^[1,2]。这两种岩浆分别在临界面富和贫氧化硅(富碱金属)一侧, 岩浆分离结晶作用分别产生一套拉斑玄武岩系和碱性玄武岩系, 演化终点分别为流纹岩(花岗岩)和响岩(霞岩), 分离结晶后的岩浆均离开临界面。

1 玄武岩和堆积岩形成时岩浆结晶度

1.1 与峨眉山玄武岩岩浆结晶度有关的问题

由组曼公式^[3], 在岩浆分离结晶中, 残余岩浆中元素含量为

$$C_{\text{浆}} = C_{\text{母}}(1 - F_{\text{晶}})^{D-1} \quad (1-1)$$

式中 $C_{\text{母}}$ ——母岩浆中元素含量; $F_{\text{晶}}$ ——岩浆-结晶相总体系中结晶相份数; D ——元素全岩分配系数。

Anderson 和 Greenland^[7]指出, 亲岩浆元素(不相容元素), 例如 Th, $D < 0.1$, D 值相对于 1 可以忽略不计; 这样式 (1-1) 简化为:

王旺章, 男, 55岁, 副教授, 1960年毕业于北京地质学院三系。从事放射性矿床地质及地球化学研究。邮政编码: 610059

1991年3月收稿, 1991年8月修改回

$$\text{Th}_{\text{岩}} \cong \text{Th}_{\text{母}} (1 - F_{\text{晶}})^{-1}$$

$$1 - F_{\text{晶}} \cong \frac{\text{Th}_{\text{母}}}{\text{Th}_{\text{岩}}} \quad \text{或} \quad f \cong \text{Th}_{\text{母}} / \text{Th}_{\text{岩}} \quad (1-2)$$

式中 f 为残余岩浆占总体系的份数, $f = 1 - F_{\text{晶}}$ 。

我们有很多方法认定和原始峨眉山玄武岩成分接近的岩石样品^[1,2] ($\text{Th}_{\text{母}}$), 如果测定了由残余岩浆形成的玄武岩的 Th 含量 ($\text{Th}_{\text{岩}}$), 由式 (1-2) 就可以求出岩浆份数 f 或结晶度 $F_{\text{晶}}$ 。 f 是岩浆演化程度的标志, f 值愈小岩浆演化程度愈高。但 f (或 $F_{\text{晶}}$) 是很难估计的理论参数, 由式 (1-2), 我们就可以用 Th 含量定量计算这一数值。

式 (1-2) 中假设 Th 的全岩分配系数等于零, (实际上 D_{Th} 并不等于零)。对于峨眉山玄武岩系, 假设层状堆积岩中 Th 含量最低的岩石代表原始岩浆最初一刻的结晶相, 这样 $\text{Th}_{\text{晶}} = 0.09 \times 10^{-6}$; 又假设, 成分接近原始岩浆的接触带边缘相橄榄辉长岩是和这种堆晶相平衡的残余岩浆, $\text{Th}_{\text{岩}} = 3 \times 10^{-6}$ 。这样, Th 的全岩分配系数:

$$D_{\text{Th}} = \text{Th}_{\text{晶}} / \text{Th}_{\text{岩}} = \frac{0.09 \times 10^{-6}}{3 \times 10^{-6}} = 0.03 \quad (1-3)$$

上式取对数

$$\lg \text{Th}_{\text{晶}} = \lg D_{\text{Th}} + \lg \text{Th}_{\text{岩}} \quad (1-4)$$

1.2 与白马基性、超基性岩结晶度有关的问题

基性、超基性层状堆积岩^[3~5], 是玄武岩浆中堆积晶所形成的岩石。理论上, 我们可以根据式 (1-2) 和 (1-3) 由堆晶相中 Th 含量 ($\text{Th}_{\text{晶}}$) 和代表母岩浆的玄武岩的 Th 含量 ($\text{Th}_{\text{母}}$), 求出堆积岩形成时的结晶度:

$$f = \text{Th}_{\text{母}} / \text{Th}_{\text{岩}} = \text{Th}_{\text{母}} \cdot D_{\text{Th}} / \text{Th}_{\text{晶}} \quad (1-5)$$

但是, 和玄武岩 (代表残余岩浆) 不同, 对于堆积岩来说, Th 含量高低只能很粗略地反映其形成时的结晶度, 而不是精确的标志。因为, 堆积岩 (橄榄岩、橄长岩和辉长岩) Th 含量很低 (含量范围为 $0.09 \times 10^{-6} \sim 0.50 \times 10^{-6}$), 仅为代表原始岩浆的玄武岩 (3×10^{-6}) 的 3%~16%, 与相应的残余岩浆中的 Th 含量比较则更低。但是, 只要有少量堆积晶间圈闭岩浆存在, 就会使堆积岩中 Th 含量增高。所以, 岩浆不同结晶阶段堆积晶所形成的岩石, Th 含量除了和结晶度有关, 还和圈闭岩浆有关, Th 含量高低不能完全代表结晶度。例如白马地区, 早期形成的橄榄岩为 $0.11 \times 10^{-6} \sim 0.20 \times 10^{-6}$, 稍后的橄长岩为 $0.09 \times 10^{-6} \sim 0.50 \times 10^{-6}$, 较晚期的辉长岩为 0.43×10^{-6} 。这样, 为了了解岩石形成时的结晶度, 需要寻找其它方法来佐证。

1.3 转变点结晶度

前面提到, 堆积岩形成时岩浆的结晶度 (f) 是很难估计的理论参数, 因此计算 f 的方法最好以实测元素含量为基础。微量元素, 特别是憎岩浆元素 (相容元素, $D > 1$), 例如 Cr、Ni 等 ($D \gg 1$)。这些元素的转变点结晶度, 就是了解层状堆积岩石形成时岩浆结晶度的好方法之一。

与相应的残余岩浆 (玄武岩) 比较, 堆晶相 (层状基性、超基性岩) 中憎岩浆元素 ($D > 1$) 的含量总是高 D 倍; 其中亲岩浆元素 ($D < 1$) 的含量, 总是低 D 倍。从图 1 看出, 和母岩浆比较, 堆晶相中憎岩浆元素的含量, 开始时也高于母岩浆中的含量; 但是当达到某一结晶度

时,堆晶相中的该元素含量,则开始低于母岩浆中的含量。我们把堆晶相中憎岩浆元素含量相对于母岩浆由富集转变为亏损,或亲岩浆元素由亏损转变为富集的结晶度,叫做转变点结晶度($f_{\text{转}}$)。

由式(1-1)

$$D = 1/f_{\text{转}}^{D-1} \quad (1-6)$$

对式(1-6)两边取对数

$$\lg f_{\text{转}} \cong \lg D / 1 - D \quad (1-7)$$

式中 $f_{\text{转}} = 1 - F_{(\text{晶、转})}$ 。这样,在堆积岩中找出含量等于原始玄武岩的某种微量元素,由于该元素的全岩分配系数 D 值可以实测^[6],因此由式(1-7),转变点结晶度($f_{\text{转}}$)可以方便地被算出。这种元素的转变点结晶度,也就是堆积岩形成时的岩浆结晶度。

橄榄岩是主要含Fe矿物的岩石,是玄武岩

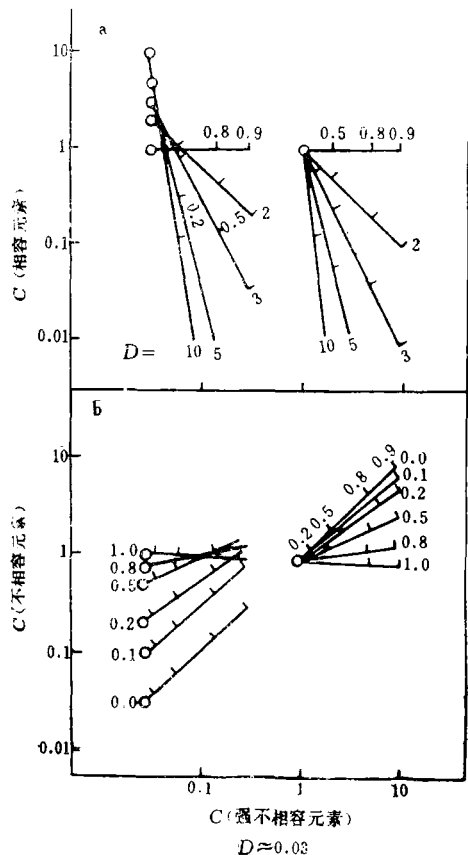


图1 岩浆分离结晶作用中元素含量关系
a. 憎岩浆元素(相容元素),图右半部空心圆点为母岩浆成分;每条射线线段代表岩浆岩系中一个元素(纵坐标)和另一个元素(横坐标)含量关系趋势线;线端点上的数字为纵坐标所表示的元素的分配系数 D , D 值越大,直线越陡;线段上的标度为母岩浆结晶度。图左半部为结晶相含量(标有相同 D 值)。圆点代表母岩浆以及和母岩浆对应的最初结晶相
b. 亲岩浆元素(不相容元素)符号含义同图1a。图左半部空心圆点为母岩浆成分;每条射线线段代表一个元素;线端点数字为该元素分配系数 D 。其中,图右半部残余岩浆成分线是一组 45° 角的直线簇,位于第一象限

Fig.1. Relationship of element contents in the process of magmatic fractional crystallization.

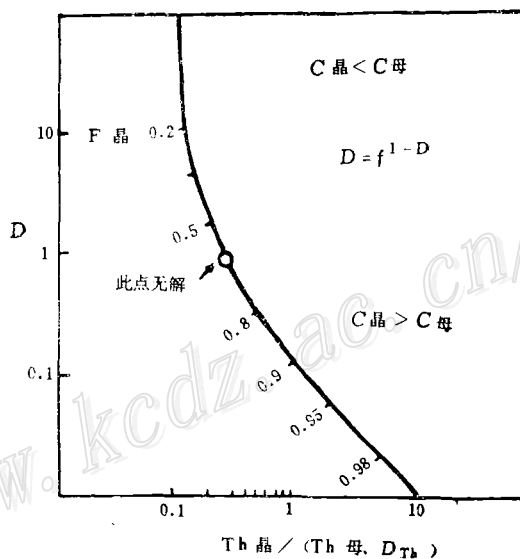


图2 转变点结晶度与元素分配系数(D)关系

图中曲线由具不同 D 值的元素的转变点组成。 $D=1$ 时,无解。在曲线左上方,对于憎岩浆元素(相容元素 $D>1$), $C_{\text{晶}}<C_{\text{母}}$;对于亲岩浆元素(不相容元素, $D<1$) $C_{\text{晶}}>C_{\text{母}}$ 。从图上看,对于强亲岩浆元素(强不相容元素, $D<0.1$),转变点的结晶度 $>90\%$

Fig.2. Relationship between crystallinity at the transition point and partition coefficients of elements (D).

浆分离结晶的最初阶段的产物。我们需要知道形成这种岩石时岩浆的结晶度是多少。

由元素转变点结晶度定义,求得转变点结晶度式(1-7)。由式(1-7)看出,转变点结

晶度 $f_{\text{晶}}$ 只与元素的分配系数有关, 而分配系数是可以实测的值, 这种关系如图 2 所示。当 $D=1$ 时, 因为式右边分母为零, 式 (1-7) 无解。

不同元素的总分配系数不同, 转变点结晶度也不同。当憎岩浆元素的全岩分配系数为不同值时, 转变点如下:

元素全岩分配系数	50	40	30	20	10	5	3	2
转变点结晶度 $F_{\text{晶}}(\%)$	7.7	9	11.1	14.6	22.6	33.1	42.3	50

2 玄武岩和堆积岩中微量元素含量关系

2.1 峨眉山玄武岩

对于同源同结晶阶段残余岩浆形成的峨眉山玄武岩, 由式 (1-1), 两个岩石 (岩 1 和岩 2) 两种微量元素 (m 和 p) 的含量比 $[C_m = C_{\text{岩}1} / C_{\text{岩}2}]$, $[C_p = C_{\text{岩}1} / C_{\text{岩}2}]$, 遵守以下关系

$$\lg C_m = R \lg C_p \quad (2-1)$$

在 $C_m - C_p (\log - \log)$ 图上, R 是玄武岩成分趋势线的斜率, 我们称 R 为丰度关系常数

$$R = \frac{D_m - 1}{D_p - 1}$$

2.2 白马堆积岩

对于同源同结晶阶段形成的白马堆积岩, 两个岩石 (岩 3 和岩 4) 两种微量元素 (m 和 p) 的含量比 $[C_m = C_{\text{岩}3} / C_{\text{岩}4}]$, $[C_p = C_{\text{岩}3} / C_{\text{岩}4}]$, 也遵守式 (2-1) 的关系。这时 R 是堆积岩成分趋势线的斜率。由图 3 a、b 看出, 堆积岩和残余岩浆成分趋势线平行。

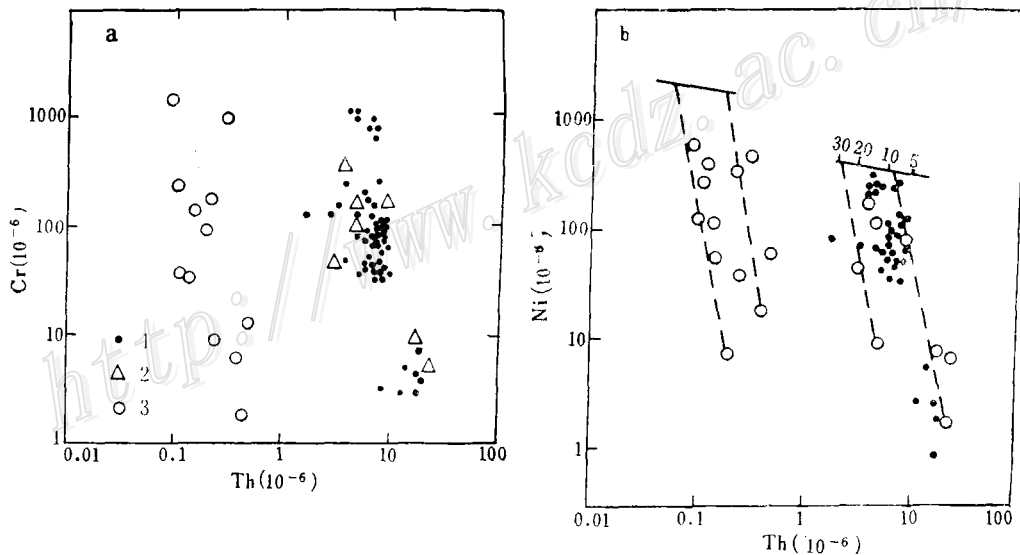


图 3 Cr 和 Th 的含量关系 (a) 以及 Ni 和 Th 的含量关系 (b)

1—峨眉山玄武岩; 2—白马地区的玄武岩、辉长岩和粗面正长岩; 3—层状堆积岩: 橄辉岩、斜长橄辉岩、橄长岩和辉长岩

Fig. 3. Relationship between Cr and Th (a) and between Ni and Th (b).

1—Emeishan basalt; 2—Basalt, gabbro and borengite of Baima area; 3—Stratified cumulates; peridotite, plagioclase peridotite, troctolite and gabbro.

2.3 堆积岩和玄武岩

如果两个岩石分别为白马堆积岩（岩3）和同源的峨眉山玄武岩（岩1），两种元素（m和P）的含量比 $C_m = C_{岩3} / C_{岩1}$ ， $C_p = C_{岩3} / C_{岩1}$ ，则遵守以下关系：

$$\lg C_m = a + R \lg C_p \quad (2-2)$$

和式（2-1）比较，式（2-2）中多了一项常数a，在 C_m - C_p （log-log）图上，a是当两个岩石中元素P的含量比 C_p 为1时，元素m的含量比的对数值，即两条平行线的垂向线距。我们将a称为堆积晶残浆关系常数。故

$$a = \lg D_m - R \lg D_p$$

2.4 丰度关系常数R和堆积晶残浆关系

常数a

由纽曼公式（1-1）和（1-2）可以推出：

$$R = (D_m - 1) / (D_p - 1) \quad (2-3)$$

$$a = \lg D_m - R \lg D_p \quad (2-4)$$

由上式可知，常数R和a只与元素（m和P）的全岩分配系数有关。因此，如果在岩浆分离结晶各个阶段，元素m和P的地球化学行为基本不变，即 D_m 和 D_p 基本不变，那么式（2-1）和式（2-2）不仅适用于同一结晶阶段，也适用于整个岩浆分离结晶过程。对于峨眉山玄武岩，这些元素（m和P）有Th、Ta、U、La、Ce、Eu、Cr、Ni等。

当元素P为极强亲岩浆元素（极强不相容元素）， $D_p \ll 0.1$ 时，可以近似认为 $D_p = 0$ ，这时式（2-3）和式（2-4）分别简化为：

$$R \cong 1 - D_m \quad (2-5)$$

$$a \cong \lg D_m - (1 - D_m) \lg D_p \quad (2-6)$$

3 微量元素含量关系图形特征

在 log-log 图上，以极强亲岩浆元素（极强不相容元素），如Th的含量作横坐标，这时横坐标就是岩浆分离结晶程度的标度；以任意元素m的含量为纵坐标，这时图形就是式（2-2）、（2-5）、（2-6）定义的情况。

由式（1-3），因为 $D_{Th} \ll 1$ ， $\lg D_{Th} < 0$ ，在 log-log 图上，堆积岩成分点（ $\lg Th_m$ ）总是在玄武岩成分点（ $\lg Th_x$ ）的左侧。由式（2-1）和式（2-2）按元素m的地球化学类型，可以把岩石成分趋势线特征反映出来。

3.1 憎岩浆元素（相容元素， $D > 1$ ）

当元素m为憎岩浆元素，如Ni、Cr等。在岩浆分离结晶过程中，元素m在结晶相中富集（相容），而在残余岩浆中亏损，和式（1-5）类似，这类元素的全岩分配系数

$$D_m = C_m / C_{残} > 1$$

当 $D_m > 1$ 时， $(1 - D_m)$ 为负值，因此元素m-Th含量关系曲线的斜率为负值，元素相容性愈大，负斜率绝对值愈大，曲线愈陡，斜率的极大值不大于 -90° ，形成以原始岩浆成分为原点的第四象限空间接近呈直角扇形曲线簇（见图1a）。

根据定义式（1-2），在结晶相中元素含量， $C_m = D_m \cdot C_p$ ，将式（1-2）写成对数形式

$$\lg C_m = \lg D_m + \lg C_p$$

因为 D_m 值大于 1, $\lg D_m$ 是正值。所以在 $\log\text{-}\log$ 图上, $\lg C_m$ 总是高于相应的 $\lg C_{m(岩)}$ 值; 结晶相中元素 m-Th 含量关系趋势线的斜率和残余岩浆中的相同 (见图 1 a)。

3.2 亲岩浆元素 (不相容元素, $D < 1$)

当元素 m 为亲岩浆元素, 如 Th、U、Hf、Ta、碱金属元素 (K、Rb、Cs)、Ba 和 Sr 等。它们在峨眉山玄武岩结晶分离过程中, 在残余岩浆中富集, 而在结晶相中亏损。在亲岩浆元素中, 我们把 $D < 0.1$ 的元素称为强亲岩浆元素 (强不相容元素)。

当 $D_m < 1$ 时, $(1 - D_m) > 0$, 因此, 该元素 m-Th 含量关系趋势线的斜率为正值。因为亲岩浆元素 D_m 值小于 1, 但不能为负值; 因此 $0 < (1 - D_m) < 1$, 即其斜率不大于 45° 。元素 m 亲岩浆性 (不相容性) 愈强, 斜率愈接近 45° 线, 但不得超出。形成以原始岩浆成分点为原点的第一象限 $0^\circ \sim 45^\circ$ 扇形曲线簇 (见图 1 b)。

结晶相中亲岩浆元素 (m) 的含量, 因 $D_m < 1$, $\lg D_m$ 为负值, 式 (2-2) 中, 相对含量 $C_m = C_{m(晶)} / C_{m(浆)}$, $\lg C_{m(晶)}$ 总是低于相应的 $\lg C_{m(浆)}$ 值。在 $\log\text{-}\log$ 图上, 结晶相中元素 m-Th 含量关系趋势线斜率也和残余岩浆中相同 (图 1 b)。

4 富 Cr、Ni 堆积层地球化学条件

我们将 Cr 和 Ni 联系到一起讨论 Cr 和 Ni 的地球化学特征。如果系统测定了岩浆岩系列岩石中 Cr 和 Ni 的含量 (图 4), 我们就可了解 Cr 和 Ni 的含量关系, Cr 和 Ni 在岩浆分

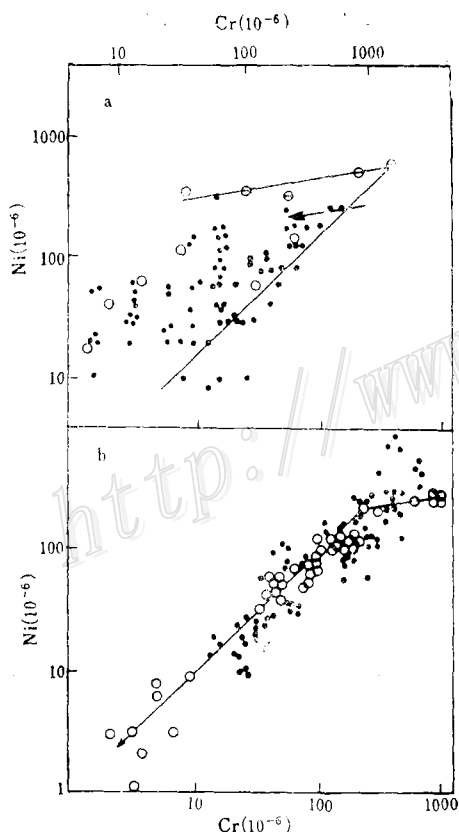


图 4 Cr 和 Ni 的含量关系

a. 层状堆积岩: $\odot$ —橄榄岩 (斜长橄榄岩) 铁矿石; $\circ$ —橄榄斜长岩及辉长岩, 其中 Cr 和 Ni $> 1000 \times 10^{-6}$ 的橄榄石铁矿石; $\bullet$ —峨眉山玄武岩。虚线代表图 4 b 中早期岩浆 Cr 和 Ni 的变化趋势
b. 峨眉山玄武岩 (空心圆圈): 早期岩浆成分上接近峨眉山玄武岩母岩浆, Cr 和 Ni 的含量皆高于 200×10^{-6} , MgO 皆高于 8%, Cr/Ni 比值高 (> 1); 中期岩浆: Cr 和 Ni 含量 $10 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$; 晚期岩浆: 为粗面-正长岩浆 Cr 和 Ni 含量小于 10×10^{-6} ; 中晚期岩浆: Cr/Ni 比值为近似于 1 的常数。黑点代表全世界范围内的玄武岩

Fig. 4 Relationship between Cr and Ni.
a—Stratified cumulates; $\odot$ —Peridotite (plagioclase peridotite) iron ore; $\circ$ —Olivine anorthosite and gabbro, containing olivine iron ore with Cr and Ni 1000×10^{-6} ; $\bullet$ —Emeishan basalt. b—Emeishan basalt (hollow circles). Solid circles stand for basalt all over the world.

离结晶过程中的分配特征 (D 值) 和结晶度, 从而推测 Cr 和 Ni 成矿的可能性。

4.1 玄武岩中 Cr 和 Ni 的关系

由式 (2-1), 对同源同结晶阶段分异的岩浆形成的玄武岩 (岩 1 和岩 2) Ni、Cr 含量关系:

$$\lg \text{Ni}_{(\text{岩}1/\text{岩}2)} = R \lg \text{Cr}_{(\text{岩}1/\text{岩}2)} \quad (3-1)$$

从图 4 看出, 峨眉山玄武岩浆 Cr 和 Ni 含量有明显线性关系, 如式 (3-1), 曲线斜率为右边系数。

$$R = (D_{\text{Ni}} - 1) / (D_{\text{Cr}} - 1) \quad (3-2)$$

残余岩浆按分异时间分成早期、中期和晚期。早期玄武岩浆的 $R=0.2$, 中、晚期 $R=1$ 。现在讨论早期形成的岩浆岩 (岩 1 和岩 2), 其成分接近峨眉山玄武岩母岩浆 ($\text{MgO} > 8\%$), Cr 和 Ni 含量大于 200×10^{-6} 。层状橄榄岩铁矿石 (图 5) 就是这种岩浆的结晶产物。对于早期峨眉山玄武岩 (岩 1 和岩 2), 将式 (3-1) 展开, 即

$$\lg \text{Ni}_{\text{岩}1} - \lg \text{Ni}_{\text{岩}2} = 0.2 \lg \text{Cr}_{\text{岩}1} - 0.2 \lg \text{Cr}_{\text{岩}2} \quad (3-3)$$

假设图中 Cr 和 Ni 含量最高的岩石 (岩 2) 代表母岩浆成分, $\text{Cr}_{\text{岩}2} = 1160 \times 10^{-6}$; $\text{Ni}_{\text{岩}2} = 260 \times 10^{-6}$, 那么, 单个岩浆岩中 (岩 1) 的 Cr、Ni 含量, 由式 (3-3) 得:

$$\lg \text{Ni}_{\text{岩}1} =$$

$$1.8 + 0.2 \lg \text{Cr}_{\text{岩}1}$$

4.2 橄榄岩堆积层和玄武岩中 Cr 和 Ni 的含量关系

由式 (2-2), 同源同结晶阶段堆积岩 (岩 3) 和玄武岩 (岩 2) 中, Ni 和 Cr 含量关系为

$$\lg \text{Ni}_{(\text{岩}3/\text{岩}2)} = a + R \lg \text{Cr}_{(\text{岩}3/\text{岩}2)} \quad (3-4)$$

$$\text{式中 } a = \lg D_{\text{Ni}} - R \lg D_{\text{Cr}} \quad (3-5)$$

$$R = (D_{\text{Ni}} - 1) / (D_{\text{Cr}} - 1) \quad (3-6)$$

从图 4 b 看出, 橄榄岩铁矿石 Cr 和 Ni 含量关系符合式 (3-1), 呈线性关系, 直线的斜率和峨眉山玄武岩早期玄武岩浆相同。

$$R = (D_{\text{Ni}} - 1) / (D_{\text{Cr}} - 1) = 0.2$$

式 (3-4) 右边第一项, a 为堆积晶残浆关系常数。 a 是玄武岩浆演化线和堆积晶演化线的垂直线距 (图 6), 即层状岩体和玄武岩 Cr 含量相同时, 两种岩石 Ni 含量的对数值之差 (式 3-5)。

当其 $R > 1$ 时, $a < 0$; $R = 1$ 时, $a = 0$; $R < 1$ 时, $a > 0$ 。因 $R = 0.2 < 1$, 所以 a 总是正值, 也就是说, 堆积晶的 Ni-Cr 趋势线, 总是在峨眉山玄武岩

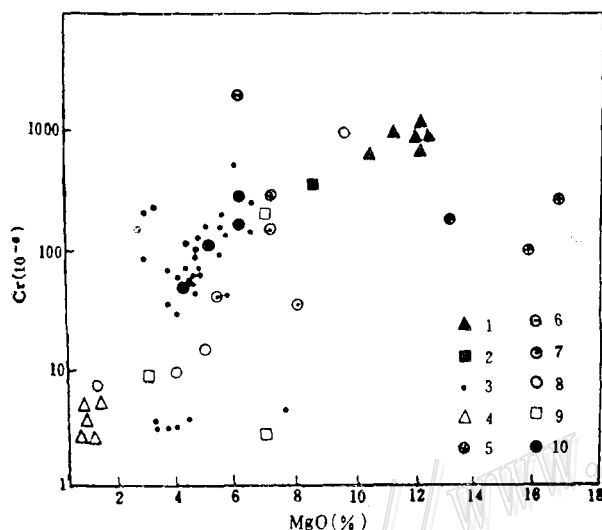


图 5 Cr 和 Mg 的含量关系

1—峨眉山橄榄玄武岩; 2—橄榄辉长岩; 3—峨眉山玄武岩; 4—粗面正长岩; 5—橄榄岩铁矿石; 6—斜长橄长岩; 7—橄长岩; 8—浅色橄长岩; 9—辉长岩; 10—峨眉山玄武岩

Fig. 5. Relationship between Cr and Mg.

1—Emeishan olivine basalt; 2—Olivine gabbro; 3—Emeishan basalt; 4—Borengite; 5—Peridotite iron ore; 6—Plagioclase troctolite; 7—Troctolite; 8—Light-colored troctolite; 9—Gabbro; 10—Emeishan basalt.

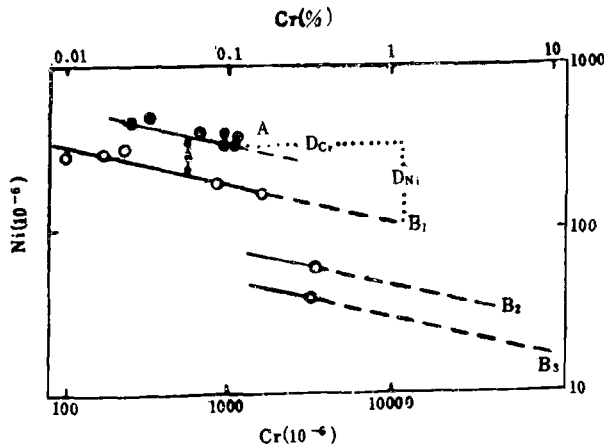


图 6 岩浆及堆积岩 Cr 和 Ni 含量关系

·—岩浆(玄武岩); ○—堆积岩(橄榄岩铁矿石)。岩浆(A)及堆积岩(B)成分变化曲线相同。曲线斜率 $R=0.2$; 岩浆曲线(A)和堆积岩曲线的垂直间距 $a = \lg Ni_{(晶/浆)} = \lg D_{Ni} - R \lg D_{Cr}$, a 值愈大, Ni 和 Cr 的 D 值越大。B₁: $D_{Ni}=3$, $D_{Cr}=11$; B₂: $D_{Ni}=9$, $D_{Cr}=41$; B₃: $D_{Ni}=21$, $D_{Cr}=101$ 。
点 A 代表母岩浆; 以点 A 为坐标原点, 最初的堆积岩(点 B)的横纵坐标分别等于 D_{Cr} 和 D_{Ni} 。图中数据取自图 1a、b。虚线表示在本区没有发现早期产物; 实线表示变化关系

Fig. 6. Relationship between Cr and Ni of magma and cumulate.
·—Magma(basalt); ○—Cumulate (peridotite iron ore).

Ni-Cr 趋势线的左上侧。当我们了解这一点时, 从 Ni-Cr 含量关系图上, 我们可以定性地了解岩石成分演化的规律性。

4.3 Cr 和 Ni 在岩浆分离结晶中期分配系数

从式(2-4)或(3-5)可以看出, 岩浆线和堆积岩线两条线的垂直间距 a , 即层状岩体和玄武岩 Cr 含量相同时, Ni 的含量对数值之差。通过作图可知道 a 值和 R 值, 就可由式(3-5)和式(3-6)求出 D_{Cr} 和 D_{Ni} 的值。对于白马橄榄岩和峨眉山早期玄武岩, $a=0.27$; 又因 $R=0.2$, 求得 $D_{Cr}=11$, $D_{Ni}=3$ 。当 R 值相同 ($R=0.2$) 随着 a 值增加, 岩石中 Ni 和 Cr 的 D 值相应增加, 如下所示:

a	0.145	0.269	0.435	0.495	0.547	0.592	0.631	0.667	0.828
D_{Ni}	2	3	5	6	7	8	9	10	16
D_{Cr}	6	11	21	26	31	36	41	26	76

反之, 如果我们知道 D_{Cr} 和 D_{Ni} 值, 也可以由式(2-3)和式(2-4)求出 R 值和 a 值。

4.4 堆积岩 Cr 和 Ni 含量关系

对于橄榄岩铁矿床堆积层, 可由我们已求得的 $D_{Cr}=11$, $D_{Ni}=3$, 代入式(3-1), 求得堆积岩(岩3)和玄武岩(岩2)中 Ni 和 Cr 的含量关系:

$$\lg Ni_{(岩3/岩2)} = 0.27 + 0.2 \lg Cr_{(岩3/岩2)} \text{ 或}$$

$$\lg Ni_{岩3} - \lg Ni_{岩2} = 0.27 + 0.2 (\lg Cr_{岩3} - \lg Cr_{岩2})$$

已知 $Cr_{岩2} = 1160 \times 10^{-6}$, $Ni_{岩2} = 260 \times 10^{-6}$, 代入上式, 求得单个堆积岩中 Cr 和 Ni 含量关系:

$$\lg Ni_{岩3} = 2.069 + 0.2 \lg Cr_{岩3}$$

4.5 富 Cr 堆积层的地球化学条件

从图 1 看出, 在研究地区橄榄岩铁矿石的结晶时期, 对于 Cr 的富集已为时过晚, 寻找 Cr 矿富集 Cr 的堆积层, 需要寻找岩浆分离结晶作用更早期的产物。从地球化学角度, 寻找富 Cr 堆积层, 以下条件较为有利: (1) 母岩浆富含 Cr, 即寻找富 Cr 橄榄玄武岩分布区;

(2) 在岩浆分离结晶过程中, Cr 能在堆积层中高度富集。即要有很高的全岩分配系数 (D_{Cr})。还需要堆积层中具备有利的矿物相, 如尖晶石铬铁矿等。其标志是造岩矿物中橄榄石中 Fo 相对含量高, 辉石中斜方辉石比例高, 斜长石中 An 的含量高, 才能对成矿有利; (3) 在岩浆分离结晶作用过程中, 结晶期愈早, 对成矿愈有利; (4) 岩浆房需要具备一定规模。例如, 母岩浆结晶最早阶段 (如为 1%) 的堆晶相可以形成 Cr 矿层, 1000m 厚的岩浆柱, 可以形成 10 m 厚的 Cr 矿层; (5) 需要有保存最初期堆积层的地质条件。例如白马地区, 堆积层底部被伟晶辉长岩所吞蚀, 这种伟晶辉长岩化学成分和微量元素的特征属于正长岩浆的结晶矿物, 从地球化学角度, 应是辉石碱性长石岩, 这显然对在类似这样的地区寻找 Cr 矿是不利的。

4.6 Ni 的富集堆积层

在峨眉山玄武岩分布范围内, 要寻找 Ni 含矿堆积层, 需要寻找结晶度小的 ($\ll 23\%$) 橄榄岩。如 $Ni = 0.1\%$ (100×10^{-6}) 的橄榄岩结晶度。由式 (1-2) 和式 (1-1) 得

$$Ni_m = D_{Ni} \cdot C_m \cdot f^{D_{Ni}-1}$$

因为形成这种结晶相时, 母岩浆中 Ni 为 340×10^{-6} 。 $100 = 10 \times 340 f^{10-1}$, $f^9 = \frac{100}{3400} = 0.0294$, $9 \log f = \log 0.0294$ $\therefore \log f = \log 0.0294 / 9 = 0.53 / 9 = 0.059$ 。 $f = 87\%$, 故 $F_m = 13\%$ 。

也就是说, 要寻找 $Ni > 0.1\%$ 的橄榄岩, 需要寻找更早期 ($F_m < 13\%$) 的结晶产物。在母岩浆最初结晶的一瞬间, 形成的堆积层 Ni 的含量最高。

攀西大型层状岩体 Cr 和 Ni 分散在早期结晶的钛磁铁矿中, 矿石中 Cr 的富集与 Fe 略有不同, 常富集于韵律层底部, 当 Mg 在韵律层中自上而下增高时, Fe 不再增高, 而 Cr 则增高, Cr 的富集部位与 Mg 一致。因为 Cr 主要富集和分散赋存于钛磁铁矿中, 所以如果没有富含 Cr 矿浆的熔离作用, 形成有价值的 Cr 矿层, 则很困难。

关于矿浆和硅酸盐熔浆熔离作用下 Cr、Ni 富集的情况, 将另文讨论。

参 考 文 献

- 1 汪云亮, 王旺章, 李巨初, 韩文喜. 白马层状辉长岩及碱性岩的成因问题探讨. 四川地质学报, 1990, 10 (3)
- 2 汪云亮, 王旺章, 李巨初, 韩文喜. 白马层状岩体岩浆分离结晶作用. 成都地质学院学报, 1990, 17 (3)
- 3 卢记仁, 刘玉书等. 攀西层状基性超基性岩体岩浆类型及成因. 矿床地质, 1987, 6 (2)
- 4 卢记仁, 刘玉书等. 攀西地区钒钛磁铁矿矿床成因. 矿床地质, 1988, 7 (1): 1~13
- 5 茅燕石, 孙似洪, 米易. 白马含钒钛磁铁矿基性岩体的特征及成因. 成都地质学院学报, 1985, 12 (1)
- 6 Neuman H., Mead J., Vitaliano C. J., Trace element variation during fraction crystallization as calculated from the distribution law. Geochim. Cosmochim., 1954, 6: 90
- 7 Anderson A. T., Greenland L. P. Phosphorus fractionation diagram as a quantitative indicator of crystallization differentiation of basaltic liquids. Geochim. Cosmochim., 1969, 33: 493

CHROMIUM AND NICKEL GEOCHEMISTRY OF EMEISHAN BASALT AND BAIMA LAYERED INTRUSION

Wang Wangzhang and Wang Yunliang

(Chengdu College of Geology, Chengdu, Sichuan Province)

Abstract

Trace element geochemical characteristics of Emeishan basalt and Baima basic and ultrabasic intrusive body are discussed in this paper. The crystallinity of Emeishan basaltic magma might be determined by Th content of the rock formed by the original Emeishan basaltic magma and that of basalt produced by the residual magma. Nevertheless, as Baima basic and ultrabasic layered cumulate was formed by cumulus of basaltic magma, the crystallinity of magma during the formation of the layered cumulate should be determined by means of crystallinity of nickel at its transition point. Geochemical environments of the Cr- and Ni-rich accumulated bed are studied, a tentative discussion is given on the relationship between chromium and nickel in basalt and layered cumulate respectively. From the equation for element abundance relationship of rocks formed at the same crystallization stage of the same magma, the equations for relationship of chromium and nickel abundances in peridotite (cumulate) and basalt are derived and, on such a basis, the partition coefficients of chromium and nickel at the early stage of magmatic differentiation and crystallization can be evaluated. From the relationship between chromium and nickel abundances in cumulus and the geochemical environment of Cr-rich accumulated bed, it is known that the crystallization and accumulation period of peridotite iron ore was too late for the enrichment of nickel and, especially, chromium, and that one should seek for earlier products of magmatic differentiation and crystallization in search for chromium and nickel deposits and accumulated beds enriched in chromium and nickel. Previous researches demonstrated that the vanadic titanomagnetite ore and its wall rocks in Baima cumulate were formed respectively by Fe-rich ore magma and silicate magma generated as a result of liquation at the early evolution stage of the original basaltic magma. Further investigation into the conditions for chromium and nickel enrichment requires more knowledge on geochemical behaviors of chromium, nickel and iron in the process of the liquation of ore magma.