

探讨火山岩浆活动与构造环境、幔源

性质关系的新方法

张 诚

(地矿部西安地质矿产研究所, 西安 710054)

摘 要 在一定构造环境下, 地幔非均质性、地幔交代、地壳混染和其他有关非岩浆分异作用会使玄武质岩浆化学成分发生变化, 而且这些影响往往不是单一出现的。另外, 构造环境不是一成不变, 而是连续演化的, 玄武岩成分也是逐渐过渡的。因此, 探讨火山岩浆活动与构造环境、幔源性质的有效方法是认真研究一定地质背景下, 与特定构造岩浆演化模式有关的玄武岩地球化学特征的时空演化特征。在进行这项研究工作中, 比值网状图是反映具有重要地质意义的不相容元素比值变化的简单而有效的工具, 可用以探讨地幔非均质性、地幔交代、地壳混染和其他有关非岩浆分异作用, 进而阐明火山岩浆活动与构造环境演化、幔源性质的关系。

关键词 火山岩浆活动, 构造环境, 幔源性质, 比值网状图

近年来, 在火山岩岩石学研究发展过程中, 岩石地球化学起到了重要作用。许多火山岩学家广泛收集了世界各地不同构造环境下不同类型的火山岩(特别是玄武岩)分析数据, 绘制出各种利用主元素和微量元素的图解, 用以判别火山岩岩石类型、岩浆系列和其产生的构造环境等。这些判别图解的出现和应用, 无疑促进和推动了火山岩岩石学的发展和进步。

但在实际应用这些判别图解中, 有时会出现与其他地质事实不符的错判, 探讨和研究造成错判的原因, 提出改进方法, 对正确应用这些判别图解, 提高火山岩岩石学研究水平具有重要意义。

1 构造环境判别图评述

当前火山岩岩石学发展最显著的特点之一是将火山岩研究与构造环境结合起来, 阐明火山岩产出的构造背景, 因而出现了许多以现代玄武岩分析数据为基础的构造环境判别图。在一定条件下, 运用这些判别图解可得到与其地质特征相吻合的结论。但在一些情况下, 也会得出与其地质事实不符的错误判别。例如, Le Roex 等(1983)研究了采自西南印度洋脊的玄武岩样品, 这些玄武岩为 P 型(plumetype)和 N 型(normal-type)以及 T 型(transitionaltype) MORB。Le Roex 等认为, T 型 MORB 成分是由 P 型和 N 型这两个端元项混合派生的。将这些玄武岩的分析数据分别投到 Pearce 等(1973)和 Meschede(1986)

作者简介: 张诚, 男, 34岁, 1982年毕业于成都地质学院核原料与核工程技术应用系; 1986年在成都地质学院获硕士学位, 现在西安地质矿产研究所工作。

收稿日期: 1991—11—06。

的判别图上(图 1)。从图 1 a 和 1 b 中可得出相同的结果, 即 P 型 MORB 样品投在板内

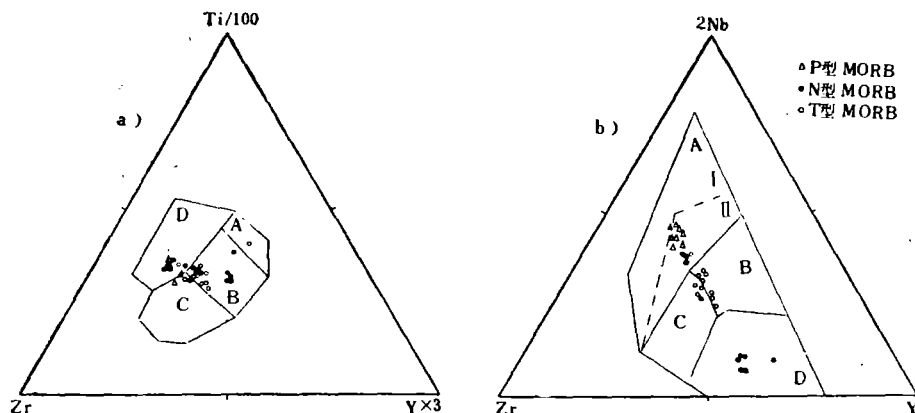


图 1 Zr—Ti/100—Y·3 (a) 和 Zr—2Nb—Y (b) 判别图

a), A+B, 低钾拉斑玄武岩(火山弧); B+C, 钙碱性玄武岩; B, 洋底玄武岩; D, 板内玄武岩。b), A I, 板内碱性玄武岩; A II + C, 板内拉斑玄武岩; B, P 型 MORB; D, N 型 MORB; C+D, 火山弧玄武岩

区, N 型 MORB 样品投在洋底区, T 型 MORB 样品则落在 P 型与 N 型 MORB 样品之间, 反映出 Le Roex 等查明的混合趋势。但是很明显, 由于地幔源的非均质性, 这两张判别图都不能详细确定洋中脊环境; 再如, Fodor 和 Vetter (1984) 研究了大西洋扩张期间, 沿巴西东部大陆边缘发育的早、中白垩世裂陷盆地中喷发的玄武岩地球化学特征。在这些盆地中, 发现了按 Le Roex 等 (1983) 的标准可与 P、T 和 N 型成分对比的玄武岩, 并将其归因于源区非均质性和地壳混染。重要的结论之一是地幔源随时间而变化。将其玄武岩分析数据分别投在 Pearce Meschede 和 Jensen 判别图上(图 2)可看出, 在 Pearce 图解中(图

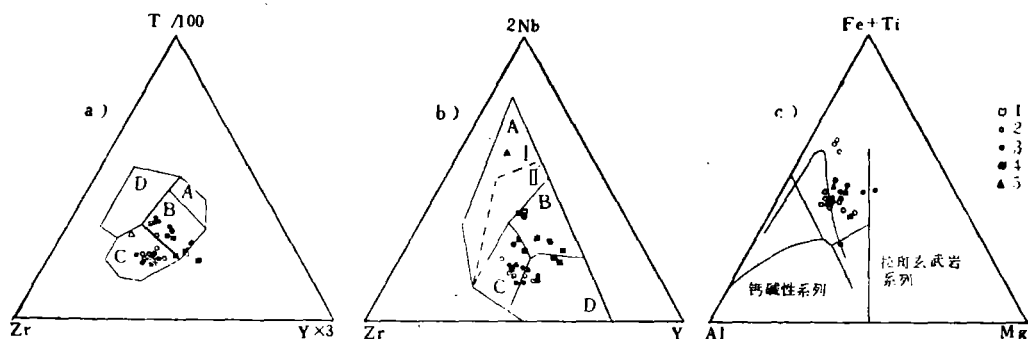


图 2 Zr—Ti/100—Y·3 (a) Zr—2Nb—Y (b) 和 Al—Fe+Ti—Mg (c) 判别图

a), A+B, 低钾拉斑玄武岩(火山弧); B+C, 钙碱性玄武岩; B, 洋底玄武岩; D, 板内玄武岩。b), A I, 板内碱性玄武岩; A II + C, 板内拉斑玄武岩; B, P 型 MORB; D, N 型 MORB; C+D, 火山弧玄武岩; 1、4,

Espirito Santos 盆地玄武岩; 2、3, Campos 盆地玄武岩; 5, Santos 盆地玄武岩

2 a), 这些玄武岩属于钙碱性系列, 与按 Jensen 图解(图 2 c)得出的其属拉斑玄武岩系列的结论相矛盾, 在 Meschede 图解上(图 b)投点分散在几个区域, 但按 Meschede 标准, 则主要属岛弧玄武岩。造成在这些判别图中投点分散和岩石分类不正确的原因是源区非

均匀性和地壳混染作用。

由此可见,不考虑其他地质因素,仅仅利用判别图解往往会得出错误的结论。

运用构造环境判别图产生错判可能是由以下原因造成的:①判别图是根据特定地区的玄武岩分析数据按统计方法建立起来的,带有一定的经验性。与不同地区错综复杂的地质构造演化特点相比,这些判别图显然具有一定的局限性;②地幔非均质性、地幔交代和地壳混染等作用都会影响玄武岩的化学成分,对于一个特定的构造环境,这种影响往往不是单一的,而是多种作用叠加的产物;③如同构造作用过程是演化过渡一样,玄武岩化学成分也是逐渐过渡的,即构造环境不是一成不变,而是连续演化的。实际上,判别图上各类之间的分界,往往不是一条判别线,而是一条判别带,即在不同类玄武岩之间存在着过渡(Rickwood, 1989);④实验条件、测试分析精度也会影响判别图解的正确应用。此外,一些人为的因素,也会影响判别图的使用效果。

地幔非均质性、地幔交代和地壳混染会引起玄武岩化学成分的变化,如何确定这些地质作用对玄武岩化学成分的影响是当前火山岩岩石学家们研究的重要课题之一。Myers等(1989)认为,探讨火山岩浆活动与构造环境、幔源性质关系的有效方法是认真研究一定地质背景下火山岩地球化学特征在时空上的演化规律。为此,他们提出了一种迅速而有效地判别地幔非均质性和其他非岩浆分异作用的方法。

2 元素比值网状图

为了通过玄武岩地球化学成分确定地幔源特征,必须去掉热液交代、变质作用和分离结晶作用,或使之减少到最小程度,以便查明初始熔体的特征。使用在玄武质岩浆中不相容元素 Nb、La、Ce、P、Zr、Ti 和 Y 的比值可达到此目的,因为这些元素在橄榄石、辉石和斜长石分离过程中是强不相容的,并且在热液交代和变质作用过程中也是相对不活动的,因此这些元素比值的变化能很好地反映出由于地幔源非均质性和其他有关非岩浆分异作用产生的熔体成分的基本变化。

近年来,网状图一直用于表现 REE 和微量元素等相对众多元素的变化。传统的方法是将元素的含量采用一个标准标准化后用于网状图中,Myers等(1989)认为,元素比值标准化后用于网状图中更有利于反映构造岩浆作用的特点。如上所述,这是因为在玄武质岩浆中不相容元素的比值不易受橄榄石、辉石和斜长石分离作用的影响,因此使用微量元素比值的网状图对岩浆分异作用不敏感,元素比值与标准比值之比,采用如下公式:

$$\begin{aligned} & (\text{元素}_1/\text{元素}_2) / (\text{元素}_1\text{标准}/\text{元素}_2\text{标准}) \text{ 或} \\ & (\text{元素}_1/\text{元素}_1\text{标准}) / (\text{元素}_2/\text{元素}_2\text{标准}) \end{aligned}$$

在元素比值网状图中分母元素的选择是任意的,但一般选择 Nb,这是因为:①在石榴石二辉橄榄岩源的熔融过程中和在橄榄石、辉石和斜长石分离作用中,Nb 在 Nb、La、Ce、P、Zr、Ti 和 Y 中是最不相容的元素;②相对于 N 型 MORB, Nb 更易富集于 P 型 MORB 中(图 3),这样,分母中的 Nb 可反映出 P 型与 N 型 MORB 成分上的差异;③一些地质背景以 Nb 负异常为特征,例如大陆拉斑玄武岩(Dupuy 和 Dostal, 1984)、与冲俯作用

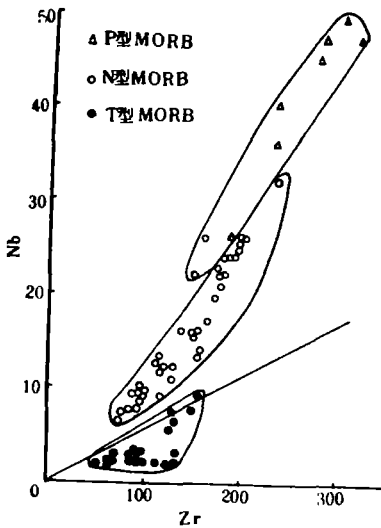


图 3 Nb—Zr 图

3 应用实例

1. 前面曾讨论过西南印度洋脊玄武岩样品在一般构造环境判别图解中出现的误判问题，采用以 Nb 标准化的比值网状图可有效地表现出幔源的非均质性（图 4）。在该图中，N 型 MORB 位于元素比值等于 1 的直线上方，P 型 MORB 位于其最下面，T 型 MORB 则处于 N 型与 P 型 MORB 之间，这一方面说明该图能有效地将 P 型与 N 型 MORB 两个端元成分区别开，并清楚地显示出形成 T 型 MORB 成分的混合关系；另一方面，自上而下，地幔源由亏损至富集，表现出地幔源的非均质性。

2. 在元素比值网状图上，巴西边缘盆地玄武岩与西南印度洋脊玄武岩相似，具有 P 型和 T 型 MORB 成分（图 5a），但 Espirito Santo 盆地和 Campos 盆地的玄武岩样品的分布模式与大洋模式不同，研究表明，它们受到了地壳混染作用的影响。

3. J. H. Breitkopf (1989) 以西南非洲纳米比亚南大马哈 (Damara) 造山带变质玄武岩为例，说明大陆裂谷环境下的岩浆特征。该区玄武岩形成时代为 750—650 Ma，并分为两套。一套称为 Chuos 建造，另一套位于其下，称为 Kuiseb 建造，该建造沿 Matchless 带分为东西两段。根据岩石的分析数据，做出 Nb 标准化的元素比值网状图（图 6）。从图 6a 可看出，Chuos 变质玄武岩样品的曲线在一个狭窄的范围内变化，研究表明，这主要是由于

有关的玄武岩 (Pearce, 1983)，用 Nb 做分母可表现出这些构造背景的重要特征。④Nb 可有效地判别富集地幔源 (Erland 和 Kable, 1976, Le Roex 等, 1983, 1985)。

由于只需考虑样品之间的相对差别，所以选择参考标准也是任意的。在现行的文献中，常常使用的是 Wood 等 (1979) 提出的“原始地幔”值，这些元素的“原始地幔”值(10^{-8})为：Nb = 0.62, La = 0.71, Ce = 1.9, P = 90.4, Zr = 11, Ti = 1527, Y = 4.87。利用“原始地幔”比值标准化，做出的网状图很容易表现出岩浆源的均质性与非均质性以及富集与亏损。

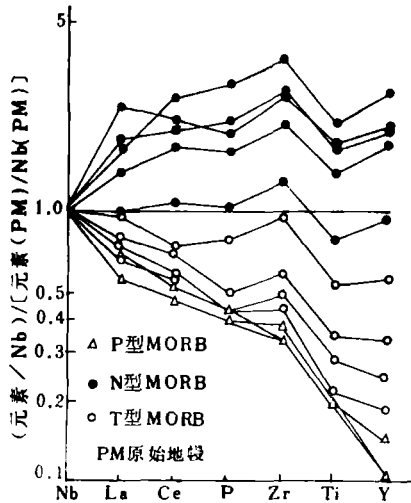


图 4 Nb 标准化的网状图

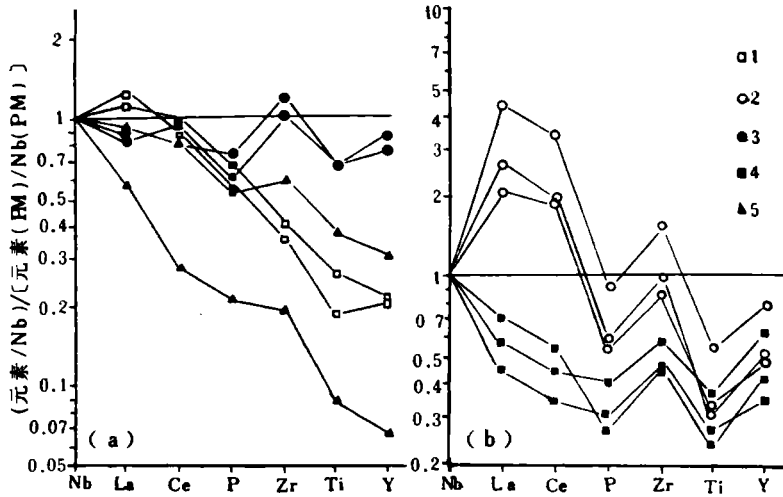


图 5 巴西边缘盆地玄武岩 Nb 标准化网状图

1、4, Espirito Santos 盆地玄武岩; 2、3, Campos 盆地玄武岩; 5, Santos 盆地玄武岩; PM, 原始地幔

由均质岩浆源产生的岩浆分异作用造成的, 而且相对于“原始地幔”, 其样品富集 Nb, 从而说明其是由均质富集岩浆源产生的。相反, 西 Matchless 变质玄武岩样品的曲线则在一个较大的范围内变化, 曲线形态也不尽相同 (图 6 b), 反映出非岩浆分异作用过程, 均是由非均质岩浆源产生的。相对于“原始地幔”, Nb 既有富集又有亏损。东 Matchless 变质玄武岩样品的曲线 (图 6 c) 表明其由非均质亏损岩浆源产生, 但非均质性程度比西 Matchless 要小, 说明由西向东, 地幔非均质程度逐渐减小。

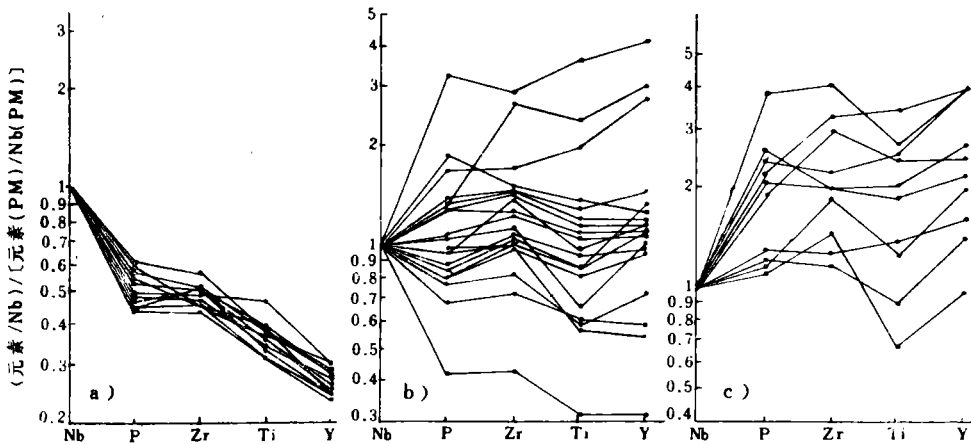


图 6 Nb 标准化网状图

a) Chuos 变质玄武岩; b) 西 Matchless 变质玄武岩; c) 东 Matchless 变质玄武岩; PM, 原始地幔

4 讨论与结论

在 R.E.Myess 等 (1989) 提出的上述方法中, 最重要的一点是采用元素比值做图, 这比单纯用单个元素做图效果更好。比较下面两张图, 可以清楚地看出使用元素比值做图的优点 (图 7)。将上述 SWIR 和 Chuos 样品投到传统的变异图 (图 7 a) 和比值图 (图 7 b)

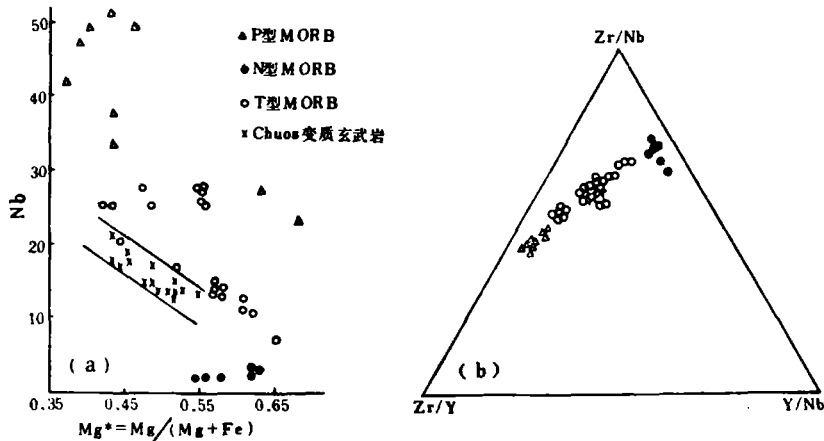


图 7 Nb—Mg* (a) 和 Zr/Y—Zr/Nb—Y/Nb 图

上, 可以看出, SWIR 样品在图 7 a 上很分散, 虽然随 Mg^* 增加 Nb 减少, 但没有明显的演化趋势。Chuos 样品则显示出相对完好的负相关趋势。

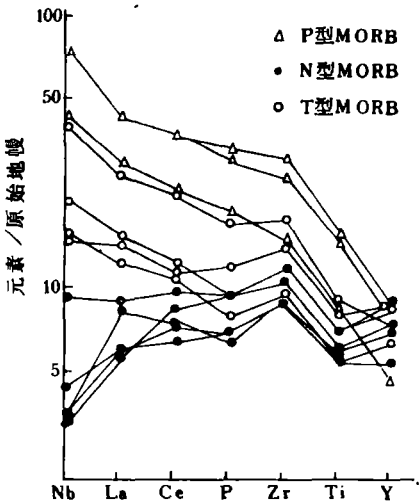


图 8 传统网状图

中, Zr、Ti 和 Y 含量很相近, 致使曲线出现重叠。而在图 4 上, Nb 标准化的比值曲线变化明显, 并能反映出象 Ti/Y 比值逐渐变化这样的微细差异。由此可见, Nb 标准化网状图不

在图 7b 上, SWIR 样品显示出较大的比值变化, 并有明显的演化趋势, 表明这种变化主要是由于某些非岩浆分异作用所致, 如幔源的非均质性 (Le Roex 等, 1983)。Chuos 样品聚成一团, 表明在图 7 a 上的演化趋势是由分异作用造成的。另外, 在网状图上, 使用标准化的元素比值要比仅用标准化的单个元素效果好, 即纵坐标采用 “(元素₁/元素₂) / (元素₁标准/元素₂标准)” 比采用 “元素/元素标准” 要好。根据 SWIR 样品的分析数据做出图 8, 并与图 4 比较, 可以看出传统的网状图 (图 8) 掩盖了地幔源明显的变化和微细的比值变化。这是因为该图受元素含量变化的影响, 并且在大多数样品

仅能明显地反映出地幔源的性质,还能表现出地壳混染作用。

应当指出,比值网状图是按地球化学理论而不是靠经验发展建立的,因此对该图解可以进行修改。在不影响网状图判别能力的条件下,可增加或减少元素。如果 Nb 值接近检测限,比值中的分母也可换成其他元素。使用元素比值的任何图解最关键的因素仍然是分析精度,只有了解了每个元素的精度,才能有效地运用这些元素的比值变化探讨有关地质问题。同时,还必须研究和评价主元素和相容元素,以便解释在网状图上产生的各种变化的原因。

在火山岩浆活动与构造环境关系的研究中,必须注意以下基本事实:①地幔源非均质性、地幔交代、地壳混染和部分熔融等地质作用会影响玄武岩的成分,因此在使用微量元素图解判别火山岩形成的构造环境时必须考虑这些作用;②在特定的构造背景下,这些地质作用往往是相互叠加的,很少单一出现;③地质构造环境是逐渐演化过渡的,几乎不存在一成不变的构造环境,玄武岩的成分也是演化过渡的。

各种地质作用的复杂性使人们难以对火山岩浆与构造环境关系问题得到一个简单的解决办法。但对玄武岩成分时空变化规律的研究是正确理解和解释火山岩浆活动、构造环境和地幔源性质之间复杂关系的基础。由此可以探讨和研究幔源性质和构造环境演化特征。

比值网状图是反映具有重要地质意义的不相容元素比值变化的简单而有效的工具。借助于比值网状图,可以探讨地幔非均质性、地幔交代、地壳混染和其他有关非岩浆分异作用,进而阐明这些作用对火山岩浆形成演化的影响。

主要参考文献

- 1 Breitkopf J.H., Geochemical evidence for magma Source heterogeneity and activity of a mantle plume during advanced rifting in the Southern Damara Orogen Namibia, *Lithos*, 1989, 23: 115—122
- 2 Meschede M., A method of discriminating between different type of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with a Nb-Zr-Y diagram, *Chem. Geol.*, 1986, 56: 207—218
- 3 Mullen E.D., MnO/SiO₂/P₂O₅: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implication for petrogenesis, *Earth planet. Sci. Lett.*, 1983, 62: 53—62
- 4 Myers R.E. and Breitkopf J.H., Basalt geochemistry and tectonic settings: A new approach to relate tectonic and magmatic processes, *Lithos*, 1989, 23: 53—62
- 5 Rickwood, P.C., 1989, Boundary lines within petrologic diagram which use oxides of major and minor elements, *Lithos*, 22: 247—263.

新春伊始,《西北地质》以崭新的面貌出现在大家面前,衷心希望广大读者协助编者一起办好我们共同的刊物,谢谢!
