Pearce 型构造岩浆地球化学判别图评述 ——以玄武岩为例

杨祝良

(南京地质矿产研究所)

自从六十年代板块构造的概念诞生以来,人们认识到有必要探讨古地理和古构造重建的方法.一段时期以来,很多学者(如 Gilluly, 1971)认为,岩浆作用与特定的大地构造环境紧密相关,不同的岩浆类型或火山岩系列产在一定的地壳环境,因而出现了许多运用主要或微量元素资料的分类体系或判别图。基于 Irvine 和 Barager (1971)以及 Miyashiro (1973)发表的主要元素图解能用来判别岩浆类型,而 Pearce (1976)则介绍 了一种统计方法来判别各种构造环境。随后,Pearce和 Cann (1973)、Pearce (1975)、Pearce 等 (1975)、Floyd 和 Winchester (1976)、Winchester 和 Floyd (1976)、Wood 等 (1979)、Pearce 等 (1979)、Meschede (1986)、Smith等 (1976)、Wood (1980)、Pearce (1982)、Holm (1982)、Mullen (1983)以及 Prestvik (1982)等人基于主要、次要及微量元素,相继作出了一系列判别图解,总数不下二、三十种。

一、玄武岩产出构造环境的分类

在迄今为止的对于构造环境的分类体系中,以 Pearce (1987) 用专家系统 (ES-CORT) 进行构造岩浆环境分类最为完整,该系统的分类方案为:

1、洋脊(Ocean Ridge) 其中包括五类(N-OR、P-OR、I-OR、B-OR 和 F-OR。

2、火山弧(Volcanic Arc) 包括发育于大洋岩石圈之上的(O-VA)和发育于大陆 岩石圈之上的(C-VA)两类。

3、碰撞带(Collison Zone) 碰撞后环境,包括后碰撞的裂谷地区。

4、板内(Within-Plate) 包括大洋岩石圈之上的(O-WP)和除强烈变薄区以外的大陆岩石圈之上的(C-WP)。

5、**大陆溢流区**(Continental Flood) 包括与俯冲无关的大陆溢流玄武岩区及强烈减 薄区(W-CF)及与俯冲有关的大陆溢流玄武岩区以及强烈减薄区。

这种分类虽然比较完善,但在运用判别图解时尚不能达到如此细的分类,因此,作者 认为,对于玄武岩的构造环境分类最好采用如下方案:

①1992.4.20收稿, 6.12改回。

(正常(亏损)大洋中脊玄武岩(N - MORB)

(MORB)

2、 板内玄武岩 {大陆板内玄武岩 (C - WPB) 大洋板内玄武岩 (O - WPB)

(WPB)

 3、火山弧玄武岩
 (IAT)

 4

 6

 6

 6

 6

 6

 6

 6

 6

 6

 6

 6

 6

 6

 6

 6

 6

 6

 6

 7

 7

 7

 7

 8

 8

 8

 9

 9

 9

 9

 9

 9

 9

 9

 9

 9

 9

 9

 <tr

(VAB)

其中, T-MORB 与 Pearce 所说的 T-MORB 不一致, 后者认为 T-MORB 指的是 介于典型 MORB 与板内玄武岩 (WPB) 之间的过渡类型, 这一点必须注意.

二、玄武岩构造岩浆地球化学判别图分类

许多作者在研究了不同环境玄武岩中的主要元素、次要及微量元素的丰度和岩浆作用 过程中各元素的地球化学习性后,运用统计方法,概括出不同环境玄武岩中这些元素的特 征,总结出各种判别图。所有这些图解我们可以称之为 Pearce 型构造岩浆地球化学判别 图 (Pearce-type tectonomagnatic geochemical discriminant diagrams)。A.R.Duncan (1987) 将这些图解按照元素特性及组合,分为如下四类:

1、利用相对不活动的次要及微量元素,最常用的为三角图 Ti / 100~Zr~Y×3 和 Ti / 100~Zr~Sr / 2 (Pearce 和 Cann, 1973) 等。

这一组主要用到 Ti、Zr、Y 及 Nb 等元素。这四种元素均为高场强(电荷 / 半径) 元素 (HFSE),因此,它们在含水流体中通常都不迁移,但当这些流体中含 F⁻等时,则 可能有所迁移,而且这些元素在交代蚀变的岩石中能保持不受影响,这种特征以及它们在 新鲜熔岩中的系统变化表明这些元素可用来研究变质和风化的玄武岩,而这些玄武岩的矿 物学及化学受影响极大。

2、利用主要和次要(非微量)元素,如 F₁~F₂和 F₂~F₃主要元素判别图 (Pearce, 1976) 以及 TiO₂~K₂O~P₂O₅和 MgO~FeO[•]~Al₂O₃三角图 (Pearce 等, 1975, 1977).

这一组图解主要应用主要元素,且主要为氧化物。一般来说,各种环境玄武岩在主要 元素上的差异不是很大,但所有这些元素对风化、蚀变及变质作用比较敏感,差别很大。 因此,首要的必须消除这些次生作用的影响。

3、利用不活动的微量元素,最常用的为 Th~Hf~Ta 三角图(Wood 等, 1979)及 Th / Yb~Ta / Yb 二元协变图(Pearce, 1982)等.

4、蛛网图 (Spidergram)

所谓蛛网图,就是选择一定的元素,按照其矿物/熔体分配系数大小排列,比较各种 环境玄武岩中这些元素的配分型式,根据标准化因子的不同又可分三种: ① MORB 标准化 以洋中脊玄武岩的平均值作为标准化因子 (Pearce, 1982, 1983).

②原始地幔标准化 以原始地幔 (Primordial mantle) 中这些元素的丰度作为标准化 因子 (Wood, 1979).

③球粒陨石标准化 以球粒陨石中元素的丰度作为标准化因子 (Thompson 等, 1983).

从实际运用来看,这种多元的系统判别图解较之二元、三元判别图更为全面而有效。 在运用所有这些图解时,至少必须基于以下两个假设:

①岩浆类型或成分与构造环境之间的关系随时间演化并未发生重大改变;

②热液蚀变、变质作用等次生作用没有明显改变岩石的成分。

三、判别图的边界条件至关重要

每个判别图都有一定的局限性,这受到很多条件的制约,如设计者所选择的样品数 量、对样品所作的处理、样品本身产出的环境是否全面等等,甚至于设计者的主观意志。 这诸多的因素使得我们在使用这些图解之前必须作通盘的考虑,细心选择合适的图解。因 此,使用者也必须对样品加以挑选,然后对测试结果作出估计,还要将样品适当分组,投 图时还应遵循一定的程序(参阅张旗,1990)。

对样品的选择显得非常重要,这主要根据所用图的边界条件。举例来说, $F_1 \sim F_2$ 和 $F_2 \sim F_3$ 图是 Pearce (1976)在用统计方法研究了 358 个样品的分析值之后提出的,其要求是:

① CaO+MgO 在 12~20%之间. 这里 CaO+MgO 作为一个简单的分离指数 (fractionation index);

②所采用的分析值必须包括所有主要元素氧化物(包括 H₂O),总量达到 99~ 101%,不必换算;

③要求新鲜样品; 蚀变及 FeO / Fe₂O₃ < 0.5 的不用,由于细碧岩化而使 CaO 降低的 也去掉;

④每种岩浆类型最多不超过 75 个样品;

⑤对于变质的样品来说,必须是低级变质的,而且没有钠长石化和次生的碳酸盐化证据.

因此,如果我们在使用图解时,不弄清其边界条件,得出的结论也必定靠不住。

另外,多个(种)图解的配套使用有时也很有效.如对云南德钦蛇绿岩中的枕状熔岩进行分析,在 V~Ti协变图上投在 MORB 区,而在图 Ti~Cr和 Ti/Cr~Ni 上则跨 IAB 与 MORB 两个区,因此,可认为该蛇绿岩产在小洋盆环境(张旗,1990).

四、避免进入图解应用的误区

在应用 Pearce 型判别图解时,使用者不一定详细了解所用图解的来龙去脉,常常忽视某些应该注意的问题,从而在不知不觉中进入误区,导致不恰当甚至错误的结论。因

第十三卷 第三号

此,从选择样品开始就必须注意到以下这些问题:

1、上文中所述及的这些图解都是针对玄武岩而言的,研究者起初主要是基于基性 (中基性)喷出岩建立了这些判别准则,如果贸然将它们应用于中酸性甚至酸性岩,则必 定会出现错误的结论,因为元素的地球化学行为对于基性岩和酸性岩有很大差别. J.A.Pearce等(1984)根据花岗岩的特征及其与构造作用的关系,选择 K、Rb、Sr、Y、 Zr、Nb(及 Ce、Ba、Th)、Ba、REE、Hf、Ta、Th等元素,对花岗质岩石的构造环境 地球化学判别进行了尝试,取得了一定的成果,这些图解对酸性(中酸性)喷出岩有很大 的参考价值。

2、玄武岩的成分主要决定于其源区成分及部分熔融程度与部分熔融作用过程。就其 源区而言,一般认为是上地幔,因此,对于主要元素组成而言,各种环境玄武岩应该是大 同小异,差别不大(这里不仅指主要元素含量,还包括各主要元素之间关系),但就次要 元素及微量元素来说,地幔源区内的各种作用对其影响则远非主要元素可比,如地幔交代 作用的影响。

玄武岩浆在其源区形成后至喷出地表,或多或少会发生成分上的变化,影响的因素包括分离结晶作用,同化混染作用及混合作用等等,这些因素对玄武岩成分的影响程度大小,直接决定了图解的使用效果及结论的正确性,举例来说,异源物质(主要是地壳,尤其是下地壳)对玄武岩浆的混染作用如果起到明显的(Significant)影响,则第二类判别图(应用主要元素)的使用就有较大的限制,一般来说,地壳物质的混染作用对主要元素影响最为明显,表现在 Si、Al等增大而 Mg等减少,这必然导致主要元素判别图的失误(A.R.Duncan, 1987),所以,在判别之前,有必要用其它方法确定是否发生过明显的混染作用.

3、Pearce 型构造岩浆地球化学判别图的应用常常会得出与事实相异的结论,此时, 主要的还应该从整个区域的地质格架以及导致最初发生火山作用的原始构造控制因素来评估,并对这种结论作一定的解释。以南非 Karoo 地区为例作如下说明:

南非 Karoo 火成岩区是世界上典型的三大大陆溢流玄武岩区(CFB)之一,以拉斑 玄武岩及与其共生的侵入岩为主。各方面证据表明,Karoo 地区大多数玄武岩没有受到 大陆壳的严重混染,但 Karoo 地区南部的玄武岩在 Ti / 100~Zr~Yx3,Ti / 100~Zr~ Sr / 2及 F₁~F₂、F₂~F₃等判别图上却投在 CAB(钙碱性玄武岩)及 LKT(低钾拉斑玄武 岩)区内,几乎没有落在 WPB(板内玄武岩)区之中,而 Karoo 地区北部的玄武岩却大 多投在 WPB 区之中。显然,造成这种矛盾的原因不在于地壳的混杂作用 (A.R.Duncan, 1987)、研究表明这与各自源区的性质密切相关,A.R.Duncan (1987) 认为可能的原因在于三个方面:

1) 南 Karoo 玄武岩成因上可能与南非活动俯冲作用(玄武岩喷发时)相关;

2)南非大陆之下的次大陆岩石圈由于活动大陆边缘的俯冲而局部向侧向或垂向增
 生;

3) 钙碱性玄武岩与南 Karoo 玄武岩的源区均受到同一作用影响,导致其成分及矿物 学上的相似性,从而形成部分熔融产物成分上的相似性.这种作用一般称为"地幔交代" (mantle metasomatism).

4、有时投图结果显示投点分布在相邻两区及其界线附近,有时甚至投在所有已标定

区域之外,此时,应慎重对待.

一般来说,若投点跨两区域 (discriminant-straddling),通常解释为存在一种过渡环境,它具有两者的共同特点,但有时却不能如此,如上面提到的云南德钦蛇绿岩。

有时,投点落在所有标定区域之外,可能的解释是这些样品并不属于上述各类环境所 包括的岩浆类型中的任何一种,而是一种新的类型,只是由于图解制作时未考虑到这类岩 石,从这一点来看,随着人们认识水平的逐步提高,一方面发现新的岩浆类型,一方面修 正已有的区域界线和岩浆类型,使这些判别图充分发挥其作用.

五、地球化学判别图推断构造环境的展望

仅仅从岩石的地球化学出发来判别构造环境显然是不全面的,这就有必要开拓新的思路.J.A.Pearce (1987)提出了一个岩石类型特征化专家系统 (an Expert System for Characterization of Rock Type-ESCORT),使地球化学证据与地质学、岩石学、矿物学证据结合起来,确定古火山岩的喷发环境。对该系统的评价表明,它能够克服利用地球化学判别图解所存在的多解性。它不仅为岩浆构造环境提供了一种解释,而且还对这种解释的可能性提供进行修正的措施。但由于其知识库的局限性,故微量元素 (主、次要及微量)判别图解及岩石图解在对其形成环境下最后结论以及鉴别分类是否正确时仍是一个有价值的方法。

六、结 论

应该注意到, 玄武岩的成分取决于其源区的成分、部分熔融的程度(及熔融的过程) 以及其上升达于地表所经历的各种分离作用和混染作用. 只有当某些或全部这些因素对一 种特殊构造环境是独一无二的时候, 我们才能用玄武岩成分作为构造环境的特征的指示 剂.

最近几年,在 Holm (1982)、Prestvik (1982)、Meschede (1985)、Schweitzer 和 Kroner (1985) 以及 Breitkopf (1986) 等人的文献中,曾多次指出这些经验性的判别图 常常不能明确区分构造环境,很多情况下所用的资料显示源区不均一或其它与非分异作用 有关的变化特征,而这些是不能用判别图来解释的,这就要求我们对所用的元素进行恰如 其分的选择。

此外,判别结果应与野外地质结合起来,注意岩石学、沉积学和构造学资料的综合分 析,以得出较为可靠的结论.

84

第十三卷 第三号

参考文 献

- [1] 张旗, 1990. 如何正确使用玄武岩判别图。岩石学报, No.2, 87-93.
- [2] Arculus, R.J., 1987. The significance of source versus process in the tectonic controls of magma genesis. J.Volcanol. Geotherm. Res., Vol. 32:1-12.
- [3] Condie, K.C., 1985. Secular variation in the composition of basalts: an index to mantle evolution. J.Petrol.
 Vol.26, No.3: 545-563.
- [4] Duncan, A.R., 1987. The Karoo igneous province a problem area for inferring tectonic setting from basalt geochemistry. J.Volcanol. Geotherm. Res., Vol. 32: 13-34.
- [5] Holm, P.E., 1982. Non-recognition of continental tholeiites using the Ti Zr Y diagram. Contrib. Mineral. Petrol., Vol.79: 308-310.
- [6] Holm, P.E., 1985. The geochemical fingerprints of different tectonomagmatic environments using hygromagmatophile element abundances of tholeiitic basalts and basaltic andesites. Chem. Geol., Vol. 51: 303-323.
- [7] Meschede, M., 1986. A method of discriminating between different types of Mid-Ocean Ridge basalts and continential tholeiites with a Nb-Zr-Y diagram. Chem. Geol., Vol. 56: 207-218.
- [8] Mullen, E.D., 1983. MnO/TiO₂/P₂O₅: A minor element discriminant for basaltic rocks of occanic environments and its implications for petrogenesis. Earth Planet. Sci. Lett., Vol.62: 53-62.
- [9] Myers, R.E. and Breitkopf, J.H., 1989. Basalt geochemistry and tectonic settings: a new approach to relate tectonic and magmatic processes. Lithos, Vol. 23: 53-62.
- [10] Pearce, J.A., 1975. Basalt geochemistry used to investigate past tectonic environment on Cyprus. Tectonophysics, Vol.25: 41-68.
- [11] Pearce, J.A., 1976. Statistical analysis of major element patterns in basalts. J.Petrol., Vol. 17:15-43.
- [12] Pearce, J.A. and Norry, M.J., 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. Contrib. Mineral. Petrol., Vol. 69:33-47.
- [13] Pearce, J.A., 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: R.S.Thorpe (Editor), Andesites. John Wiley and Sons, New York, NY, pp: 525-548.
- [14] Pearce, J.A., 1987. An expert system for the tectonic characterization of ancient volcanic rocks. J.Volcanol. Geotherm. Res., Vol. 32:51-65.
- [15] Prestvik, T., 1982. Basic volcanic rocks and tectonic setting: a discussion of the Ti Zr Y discrimination diagram and its suitability for classification purposes. Lithos, Vol. 15: 241-247.
- [16] Wood, D.A., Joron, J.L. and Treuil, M., 1979. A re-appraisal of the use of trace elements to classify and discriminate between magma series erupted in different tectonic settings. Earth Planet. Sci. Lett., Vol. 45: 326-336.
- [17] Wood, D.A., 1980. The application of a Th Hf Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province. Earth Planet. Sci. Lett., Vol. 50: 11-30.

PEARCE-TYPE TECTONOMAGMATIC GEOCHEMICAL DISCRIMINANT DIAGRAMS FOR BASALTS: A REVIEW

Yang Zhuliang

(IGMR, Nanjing)

Abstract

Tectonomagmatic geochemical discriminant diagrams $(TGDD_s)$ were frist used by J.A.Pearce (1975), who and other researchers have designed so many diagrams that had been relatively helpful to tectonic-setting-discrimination of basalts. These diagrams are statistical and have restricted applications. Many authors used these diagrams to discriminate the tectonic settings with no respect to those limits, so that a lot of mistakes occurred inevitably. In order to get a correct result, we must make an investigation on the source of a diagram and look through all of the restrictions on the diagram.

The $TGDD_s$ cannot be used alone. If evidences of geology, mineralogy, petrology and sedimentology were considered meanwhile, the results must be relatively convincible.

Key Words tectonic setting, geochemistry, boundary condition, discriminant diagram, basalt.