卷 (Volume) 31,期 (Number) 1,总 (SUM) 112
页 (Pages) 92～103, 2007, 2 (February, 2007)

大地构造与成矿学
Geotectonica et Metallogenia

关于岩石微量元素构造环境判别图解使用的有关问题

赵振华
(中国科学院广州地球化学研究所,广东 广州 510640)

摘 要:针对目前应用愈来愈广泛的不同岩石,特别是岩浆岩的微量元素构造环境判别图解使用过程中存在的问题,从这些判别图解建立的原理,介绍了微量元素构造环境判别图解的使用原则。强调指出:所采集的样品必须新鲜(无蚀变或极弱蚀变)、非堆晶的岩石;选择的判别图解必须与判别的岩石类型相一致,即对花岗岩类要用花岗岩的判别图解,不能用玄武岩的判别图解;对特殊类型岩石要选择专门用于该类型岩石的判别图解,如碱性花岗岩,钾质火成岩;要应用多种图解综合判断;不能用单个样品,而应作多个样品分析;要注意所选择判别图解的特别说明等。此外,一些构造环境判别图解还能给出岩石的成岩过程和源区。

关键词:构造环境判别图;微量元素;后碰撞;碱性花岗岩;钾质火成岩
中图分类号: P583 **文献标识码**: A **文章编号**: 1001-1552 (2007) 01-0092-12

0 引 言

进入 21世纪,全新的地球系统观在全球尺度上把地球看成是相互作用的各组成部分集成的综合系统,它包括了无数个相对独立、相互作用、相互依赖的不同层次、不同类型和不同作用的系统。正是基于此,地球动力学成为地球科学中重要的、热门的研究课题,而其中大地构造格架及演化又是重要的研究内容之一。随着地球化学分析测试技术的不断发展,在大地构造研究中越来越多地引入了地球化学的研究方法、手段和成果,如用岩石的,特别是火成岩的特征微量元素组合特点进行构造环境判别研究占有特殊地位。微量元素地球化学研究在大地构造研究中发挥了重要作用,但在当前愈来愈广泛的应用中也出现了不同问题,主要表现在:不考虑所研究的岩石类型,任意选择文献中的微量元素构造环境判别图解,如将玄武岩的构造环境判别图用于花岗岩;在同一岩石类型中不区分特殊类型的岩石,而采用普通类型的构造环境判别图,如在花岗岩中未能区分碱性花岗岩和普通钙碱性花岗岩,在火成岩中未能区分钾质的,如橄榄玄粗岩系 (shoshonitic)火成岩和普通钙碱性和拉斑质火成岩;在样品采集上未注意不能用蚀变的或堆晶的岩石;在运用判别图解过程中不按图解的应用先后顺序,笼统地将多个图解不分先后同时使用等。本文针对上述问题,从微量元素构造环境判别图解的构建原理出发,重点分析各种图解的应用范围、方法及应注意的问题。

1 构建微量元素构造环境判别图解的原理

地球化学是一门示踪科学,它主要是依据地质作用过程的产物——如岩石、矿床中所保留的地球化学记录,如各类岩石中化学元素和同位素的含量、

收稿日期: 2006 - 04 - 26;**改回日期**: 2006 - 05 - 31
基金项目:国家自然科学基金项目 (编号 40373017)资助.
作者简介:赵振华 (1942 -),男,研究员,地球化学专业. Email: zhzhao@gig ac cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

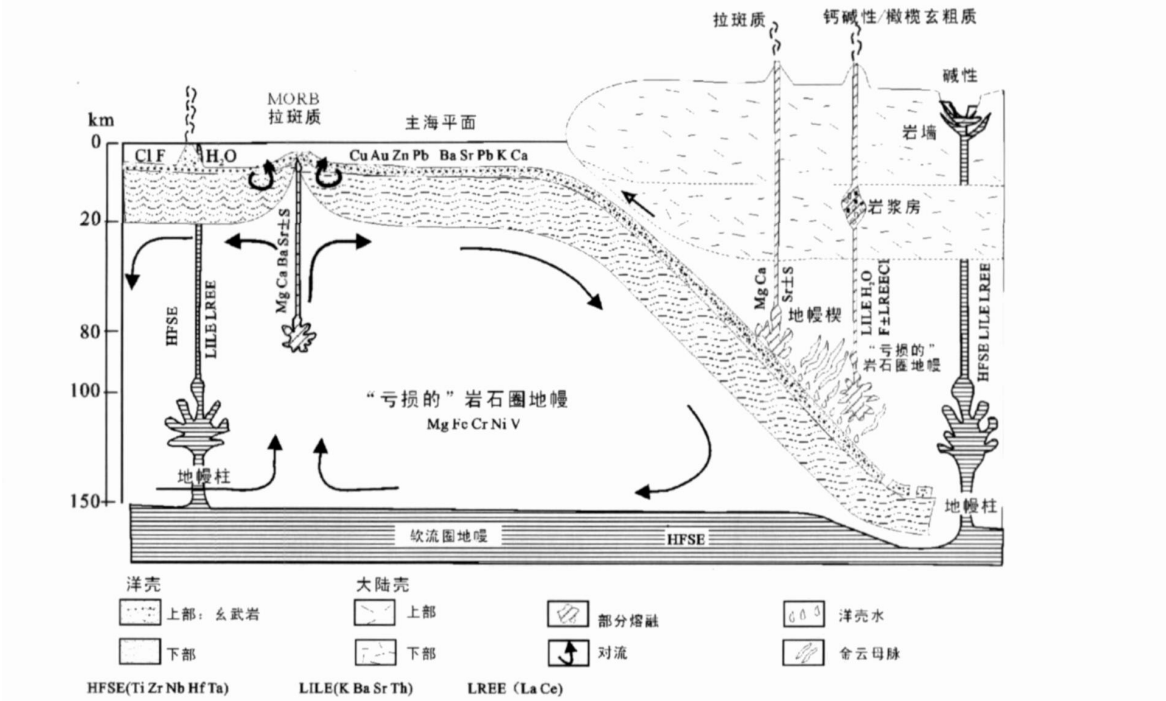


图 1　洋 - 陆俯冲带剖面中岩浆岩与微量元素的分布 (Muller *et al* , 1997)

Fig. 1　Schematic cross section showing distribution of magmatic rocks and trace elements in a typical ocean-continent subduction profile

组合和比值等,反演各种地质、地球化学过程。基于此,地球化学的研究是反序性质的。大量地球化学研究表明,各种岩石中元素组合、比值的变化是该岩石形成时所处大地构造环境的反映,或者说,同一类岩石产出的构造环境不同,相关的成岩过程的物理、化学条件也有明显的差异,造成了岩石中元素,特别是微量元素组合及比值等不同,这是构建常量和微量元素构造环境判别图解的基础。以俯冲带为例,随洋壳俯冲深度增加,变质程度由角闪岩相过渡为角闪榴辉岩相? 榴辉岩相,相应地,在岛弧岩浆岩系统中靠近洋壳方向形成拉斑玄武岩,在俯冲带内侧大陆方向则形成高铝玄武岩和碱性岩。这样,在横越岛弧或活动大陆边缘,随俯冲深度增加,由大洋向大陆方向岛弧岩浆岩显示微量元素的成分 (含量、比值)极性变化,如 K→Rb→Sr→Ba→Cs→P→ Pb→U→Th→REE等逐渐增加,一些典型的元素对比值如 B/Be、Ce/Rb、U/Zr、Th/U、Cs/Th、Ba/Th和 Be/Th等也发生系统变化 (图 1)。这种成分极性变化是构建岩石构造环境判别图解的重要基础。

这种图解建立的基础主要有两方面,一是对岩石形成的大地构造环境 (geotectonic setting)认识的积累,二是对岩石中化学元素,特别是微量元素的准确分析技术的进步和分析数据的积累,这两者缺一不可。对于前者,20世纪 60年代开始兴起的全球构造 ——板块构造学说为认识各种大地构造环境奠定了基础,而微量元素高精度、高准确度分析技术的发展为建立各种构造环境判别图解提供了大量资料。正是在这种背景下,在 20世纪 70年代初期 (1971, 1973)英国学者 Pearce和 Cann提出了依据化学成分限定岩浆起源的大地构造环境,建立玄武岩类的构造 - 岩浆判别图解 (tectonic magmatic discrimination diagram)。随着分析测试技术的发展和板块构造学说应用的深入,这些图解不断补充和完善,岩石类型从不同类型的玄武岩扩大到安山岩、花岗岩和沉积岩等。表 1汇总了目前为止文献中常见的各种类型岩石的微量元素构造环境判别图解。应该指出的是,同时还提出了玄武岩类 (Pearce *et al* , 1977)和花岗岩类 (Bechelor *et al* , 1985; Mania and Piccdi, 1989)的主元素构造环境判别图解,限于篇幅,本文不予讨论。

综合分析对比 Pearce及不同学者提出的不同类型岩石构造环境的各种判别图解,它们的构建主要基于下述原理。

1.1　用已知确切构造环境的岩石确定图解中相应构造环境的区域

在图解中不同构造区域 (界线)的确定是根据

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1 不同作者提出的岩石微量元素构造环境判别图解

Table 1 Summary of trace element diagrams for discriminating tectonic settings

作者*	岩石类型	判别图解	区分的构造环境
Pearce *et al*, 1973	玄武岩	Ti/100-Zr-Y ×3	岛弧拉斑玄武岩;MORB;岛弧拉斑和钙碱性玄武岩,板内玄武岩
	玄武岩	Ti/100-Zr-Sr/2	岛弧玄武岩;钙碱性玄武岩;MORB
	玄武岩	Ti-Zr	火山弧玄武岩;板内玄武岩,MORB
Pearce *et al*, 1977	玄武岩	Zr/Y-Ti/Y	板内玄武岩;板缘玄武岩
Pearce *et al*, 1979	玄武岩	Zr/Y-Zr	火山弧玄武岩;MORB;板内玄武岩;MORB +火山弧;MORB +板内玄武岩
Wood, 1980	玄武岩	Hf/3-Th-Ta	板内;E型 MORB;N型 MORB;火山弧
Pearce, 1982	玄武岩	Ti/Y-Nb/Y	火山弧;板内;MORB
Shervais, 1982	玄武岩	Ti-V	岛弧;大陆溢流玄武岩;洋岛及碱性玄武岩;MORB +弧后
Meschede, 1986	玄武岩	2Nb-Zr/4-Y	板内;N-MORB +火山弧;E-MORB;板内 +火山弧
Meschede, 1986	玄武岩	2Nb-Zr/4-Y	板内;N型 MORB +火山弧;E型 MORB;板内 +火山弧
Cabanis *et al*, 1989	玄武岩	La/10-Y/15-Nb/8	火山弧;弧后;大陆裂谷;E型 MORB;N型 MORB;
Pearce, 1982	火山弧玄武岩	Cr-Y	火山弧;板内;MORB
		Cr-Ce/Sr	火山弧;板内;MORB
		K_2O/Yb ×10^{-4}-Ta/Yb	火山弧;板内;MORB
Floyd *et al*, 1975	碱性玄武岩-拉斑玄武岩	Nb/Y-Zr/P_2O_5 ×10^{-4}	大洋碱性玄武岩;大陆碱性玄武岩;大陆拉斑玄武岩;大洋拉斑玄武岩
Balley, 1981	安山岩	La/Yb-Sc/Ni	大洋岛弧(低钾的和其它);大陆岛弧;安第斯型(活动陆缘)
Thieblemont and Tegyey, 1994	SiO_2 >55% 岩浆岩	Nb/Zr-Zr	岛弧或大陆边缘;陆-陆碰撞带;大陆板内-过渡区和洋岛
Muller *et al*, 1992	钾质火成岩	Zr/Al_2O_3-TiO_2/Al_2O_3	板内;早期 +晚期洋弧;大陆弧 +后碰撞弧
	钾质火成岩	Zr/Al_2O_3-P_2O_5/Al_2O_3	早期洋弧;晚期洋弧
	钾质火成岩	TiO_2-Al_2O_3	板内
	钾质火成岩	Ce/P_2O_5-Zr/TiO_2	大陆弧;后碰撞弧
	钾质火成岩	Y-Zr	板内
Muller *et al*, 1992	钾质火成岩	TiO_2/100-La-Hf ×10	早期洋弧 +晚期洋弧;大陆弧 +后碰撞弧
	钾质火成岩	Zr ×3-Nb ×50-Ce/P_2O_5	大陆弧;后碰撞弧
	钾质火成岩	TiO_2/10-La ×10-P_2O_5/10	早期洋弧;晚期洋弧
Pearce *et al*, 1984	花岗岩	Nb-Y	板内;火山弧 +同碰撞 +洋中脊
	花岗岩	Ta-Yb	板内;同碰撞;火山弧;洋中脊
	花岗岩	Rb-Y+Nb	同碰撞;火山弧;板内;洋中脊
	花岗岩	Rb-Y+Ta	同碰撞;火山弧;板内;洋中脊
Harris *et al*, 1986	花岗岩	Rb/10-Hf-Ta ×3	火山弧;碰撞;洋中脊;板内
	花岗岩	Rb/30-Hf-Ta ×3	火山弧;同碰撞;碰撞晚期-碰撞后;板内
Pearce, 1996	花岗岩	Rb-Y+Nb	同碰撞;后碰撞;板内;火山弧;洋中脊
Eby, 1992	碱性花岗岩	Rb/Nb-Y/Nb	A_1:非造山,大陆裂谷或板内; A_2:大陆边缘,后造山,热点
	碱性花岗岩	Sc/Nb-Y/Nb	同上
	碱性花岗岩	Nb-Y-Ce	同上
	碱性花岗岩	Nb-Y-Ga ×3	同上
Bhatia and Cyook, 1986	杂砂岩	La-Th-Sc	大洋岛弧;大陆岛弧;活动陆缘;被动陆缘
		Th-Sc-Zr/10	大洋岛弧;大陆岛弧;活动陆缘;被动陆缘

*相关文献见赵振华(1997).

大量已知确切构造环境的、已经过详细地质、地球化学研究的岩石样品的分析数据,经统计分析建立的。因此,建立各种岩石的分析测试资料数据库,特别是构造环境确切的、无争议的岩石分析资料的大量积累,使判别图解中区域的重叠范围越来越小,判别效果越来越好,例如,Pearce *et al* (1984)年提出的花岗岩微量元素构造环境判别图是基于 600个详细研究的花岗岩的化学成分数据库。

1.2 构建图解的元素选择

首先,所选择的元素是常用分析方法能够精确分析的。表 1中各种图解中的微量元素都是在建立图解时能精确分析的元素,上世纪 70～80年代主要

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

是 X荧光光谱 (XRF)和中子活化,特别是仪器中子活化分析 (NAA)。目前,等离子体光谱 (ICP-AES)和等离子体质谱 (ICP-MS)方法的普遍应用,使这些图解的应用更加普遍。

以不活动的高场强 (HFS)元素和稀土元素构建图解。即在所有的图解中主要是以不活动微量元素,并主要是高场强元素为基础构建。由于它们在溶液中强烈的不活动性,使它们的组合特点可以反映岩石所形成的构造环境。这些元素主要是 Zr、Hf、Nb、Ta、Ti、Th、P、Y、Yb等。必须指出的是,对于花岗岩类,由于其形成过程中常常经历强烈的分离结晶 (结晶分异)作用,因此在花岗岩类的判别图解中,加入了对分离结晶作用非常敏感的强不相容元素 Rb。

其次,在构建图解中为了提高判别效果,即减少重叠区和多解性,往往不是单元素 -单元素图,而是比值 -比值图、单元素 -比值图,如 Ti/Y-Nb/Y; Zr/Y-Ti/Y; La/Yb-Sc/Ni; K_2O/Ta-Ta/Yb; TiO_2-Y/Nb; Nb/Y-Zr/P_2O_5 等。选择这些元素比值主要是基于它们在成岩过程中 (部分熔融、分离结晶)的地球化学行为,如它们的行为非常相似,它们对部分熔融和分离结晶作用不敏感,因而可以反映源区物质特征。例如,板内玄武岩比其它类型玄武岩有较高的 Ti/Y和 Nb/Y比值,反映了其源区相对于 MORB和火山弧玄武岩经历了地幔交代的富集作用,因此可用这些比值将板内玄武岩与 MORB和火山弧玄武岩分开。而 Nb/Y比值的不同可进一步区分板内不同的玄武岩,Nb则可区分 N型与 E型 MORB。同样,Zr/Y和 Ti/Y也是源区的反映。

1.3　岩石的源区与其形成的构造环境密切相关

岩石,特别是岩浆岩的类型及地球化学特点决定于其源区及形成过程,而源区及成岩过程与其形成的构造环境密切相关。Pearce构建的构造环境判别图解将岩石的源区与其形成的构造环境联系起来。不同构造环境的花岗岩的源区 (Pearce, 1996)如 ①洋脊花岗岩:与陆壳无相互作用的普通亏损地幔; ②板内花岗岩:与陆壳不同程度的相互作用的普通富集地幔 (由板内过程产生); ③火山弧花岗岩:由俯冲流体加 (减)与陆壳相互作用所形成富集的普通亏损地幔; ④同碰撞花岗岩:由俯冲陆壳产生的流体和熔体而膨大的 (augmented)地幔或地壳; ⑤后碰撞花岗岩:富集地幔 +广泛的地壳相互作用 (通过俯冲和 /或板内过程)。图 2是花岗岩源区和构造环境的综合 (Pearce, 1996)。

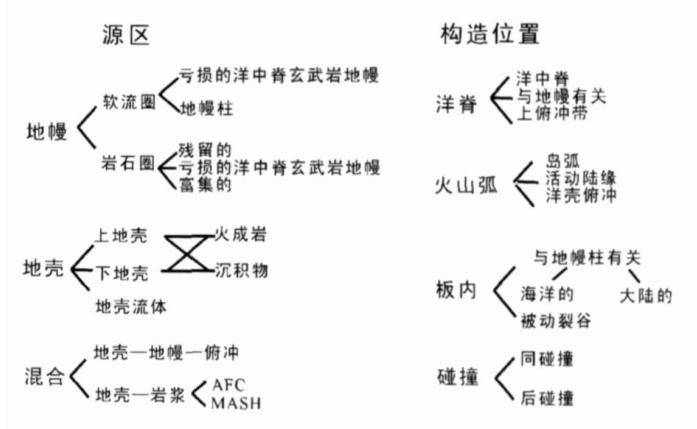


图 2　花岗岩源区和构造环境 (Pearce, 1996)

AFC - 分离结晶混染; MASH - 混合岩浆,混染,分凝,均一化

Fig. 2　Summary of the relationships between the source regions and tectonic settings for granitic rocks

上述俯冲碰撞带微量元素成分极性 (图 1)是构建不同类型火成岩构造环境判别图解的基础。

对于火山弧玄武岩,由于其形成过程中有大量流体的参与,它们富集了在流体中富集的元素,如 K、Sr、Ba、Rb、Th等,而高场强元素 Ti、Nb、Ta、Zr、Hf等相对亏损,因此,常用在流体中微量元素地球化学行为的差异来区分岛弧和板内及 MORB玄武岩。例如,K和 Ta在玄武岩中地球化学行为差异大,流体可以使 K明显富集,由此,火山弧中 K/Ta比值总是高于 MORB和板内玄武岩,据此,用 K_2O/Yb-Ta/Yb可以区分出火山弧和 MORB及板内玄武岩 (图 3)。类似的还有 Ce和 Sr.当有流体存在时行为出现差异.

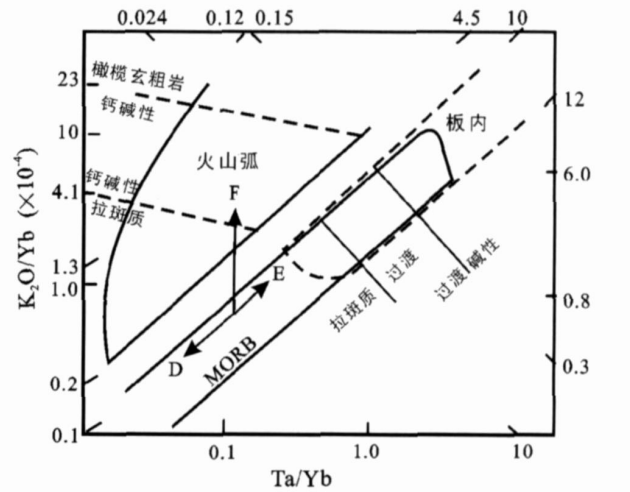


图 3　以 Yb为标准化因子的玄武岩 K-Ta判别图解 (Pearce, 1982)

Fig. 3　Discrimination diagram for basalts based upon K-Ta covariations by using Yb as a normalizing factor

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Sr相对于 Ce富集,因此在火山弧玄武岩中 Ce/Sr比值明显较洋中脊玄武岩 (MORB)降低,因而可用 Cr-Ce/Sr图区别 MORB和火山弧玄武岩。

一些强相容元素如 Cr,是分离结晶作用的灵敏指标,它们在分离结晶过程中进入橄榄石、斜方辉石、单斜辉石和尖晶石中,由于地幔源区部分熔融程度或分离结晶历史不同,因而在火山弧玄武岩中含量明显低于 MORB和板内玄武岩, Y在火山弧玄武岩中相对于其它类型玄武岩也亏损,故可用 Cr-Y图解区分它们。

1.4 图解的联合使用和分步骤判别

在构造环境判别图解中,不同区域常常发生重叠或在一个区域中代表两种环境,如火山弧和同碰撞,火山弧和 MORB等。为解决这个问题采用了联合使用几个图解,或分步进行判别 (详见下述)。

不同作者提出的岩石微量元素构造环境判别图解概括于表 1中。

2 特殊类型岩石的判别图解

20世纪 80年代以来,一些新类型的火成岩受到普遍关注,如碱性 (或 A型)花岗岩、橄榄玄粗岩系火成岩 (Shoshonite)或钾质火成岩 (Potassic igneous rocks,一般情况下 K_2O/Na_2O 分子比 ≥1;在 SiO_2 50% ±, K_2O >1%, K_2O/Na_2O分子比 <1)。由于这些岩石特殊的岩石化学和微量元素组成特点,已有的与它们相关的判别图解均不能区别出它们所形成的特殊环境,甚至出现与实际地质情况不符的误判。例如,钾质火成岩的显著特点是富 K,亏损高场强元素 Ti、Nb、Ta,因而已建立的用于玄武岩的和花岗岩的图解,如 Ti-Zr; Ti-Zr-Y; Ti-Zr-Sr; Zr/Y-Zr以及 Hf/3-Th-Ta等是不适用的,因为在 Ti-Zr和 Ti-Zr-Y图解中钾质火成岩处于所确定的各种构造环境之外。Ti-Zr-Sr图解不能将产于板内环境的和产于与俯冲有关的钾质火成岩区分开,在这种图解中多数钾质火成岩被错投于钙碱性区,后碰撞环境被错划为洋壳玄武岩。在 Hf/3-Th-Ta图解中,几乎所有钾质火成岩,即使那些已知产于板内构造的,都被错判为与俯冲有关。对于 Zr/Y-Zr图解,产于大陆弧和洋内构造环境与俯冲有关的钾质火成岩被错判为洋中脊玄武岩 (MORB)和板内玄武岩。基于上述,目前已建立了特殊类型岩石的构造环境判别图解 (Eby, 1992; Muller *et al*, 1992, 1997)。

2.1 碱性 (A型)花岗岩

碱性 (A型)花岗岩是花岗岩类中重要的岩石类型。由于它产在特殊的构造环境而成为地球动力学研究的重要"岩石探针"。对于其构造环境的研究,如果用普通花岗岩类的构造判别图,它们一般落在板内或同碰撞或火山弧,不能反映其确切的构造环境。Eby(1992)提出了用于碱性花岗岩构造环境的判别图 (图 4),即 Rb/Nb-Y/Nb; Sc/Nb-Y/Nb; Nb-Y-Ce; Nb-Y-3Ga等,这些元素均是碱性花岗岩非常特征的元素,如 Nb、Rb、Ga、Y的明显富集。在上述图解中,碱性花岗岩被划分为 A_1 和 A_2 两种类型, A_1 型属非造山板内花岗岩,与大陆裂谷环境或地幔热点 (地幔羽)有关; A_2 型属于后碰撞或后造山环境,一般为大陆边缘。

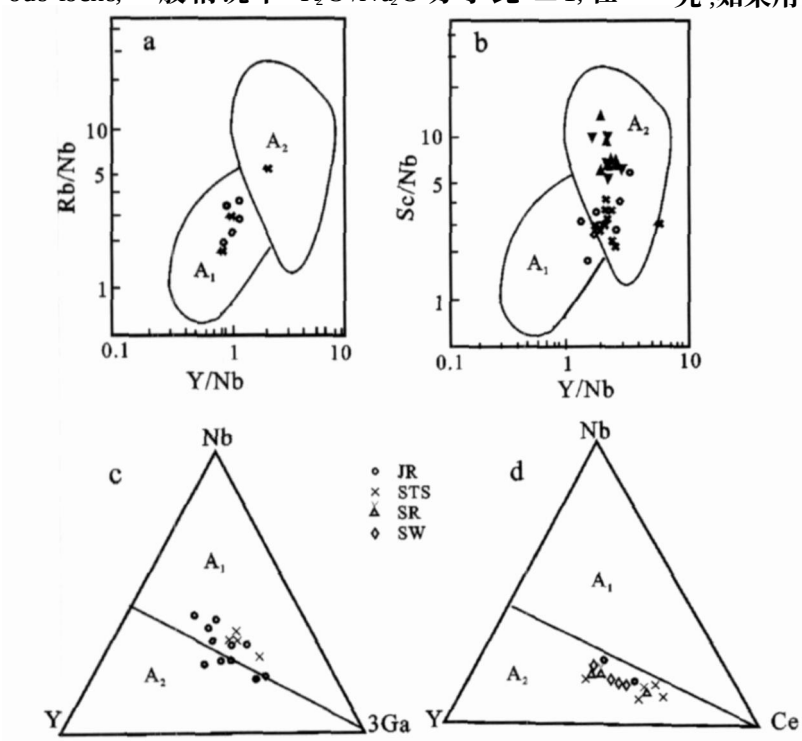


图 4 碱性花岗岩构造环境的判别图 (Eby, 1992)

Fig. 4 Diagrams for discriminating tectonic settings of alkali granites

因此,在根据岩石化学和微量元素、稀土元素特征确定岩性属碱性花岗岩后,应采用上述图解确定其构造环境。

2.2 钾质火成岩

如上述,对于已由岩石化学及微量元素等特点 (K_2O/Na_2O 分子比 ≥1;在 SiO_2 50% ±, K_2O >1% , K_2O/Na_2O 分子比 <1)确定属钾质火成岩后,由于其

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

成分的特殊性,不能用普通火成岩的构造环境判别图,应采用下述图解判别其构造环境: Zr/Al_2O_3-TiO_2/Al_2O_3; Zr/Al_2O_3-P_2O_5/Al_2O_3; Ce/P_2O_5-Zr/TiO_2; TiO_2-Al_2O_3 和 Y-Zr 等图解 (Muller *et al*, 1992, 1997) (图 5)。

应该指出的是,对于钾质火成岩,在应用上述图

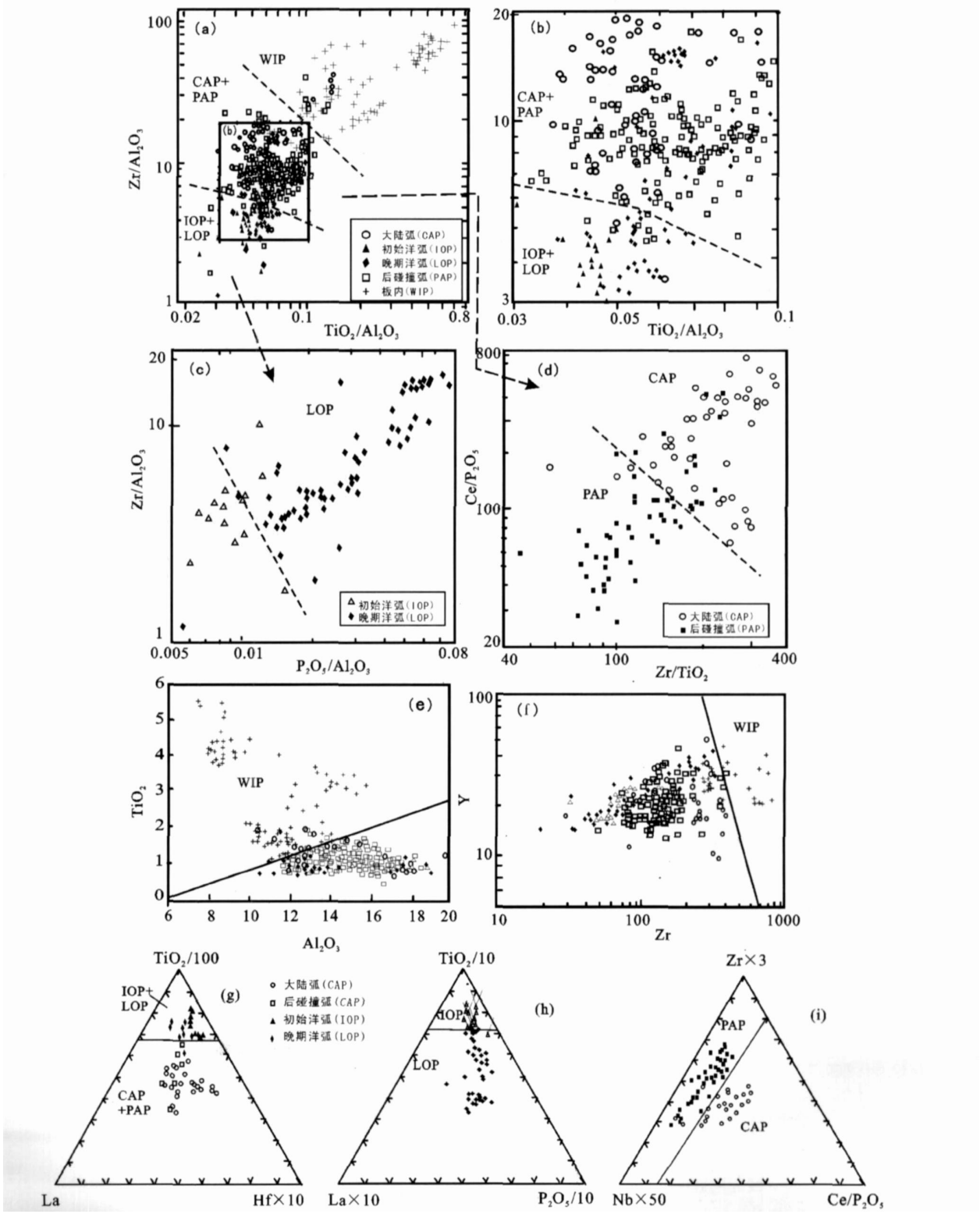


图 5　钾质火成岩构造环境判别图

Fig. 5　Hierarchical set of discrimination diagrams for potassic igneous rocks from different tectonic settings

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

解时必须按一定步骤联合使用,即根据图解逐步判别(详见下述)。

3 判别图解的联合使用和逐步判别

所选择的构造环境判别图必须与所研究的岩石类型相一致,这是首先必须注意的。其次是不能孤立地运用单一图解,而应综合运用多个图解。例如,对于玄武岩可联合运用 Ti-Zr-Y, Ti-Zr和 Ti/100-Zr-Sr/2图解,用 Ti-Zr-Y识别板内玄武岩,然后用 Ti-Zr识别其它类型,对于未蚀变的可用 Ti/100-Zr-Sr/2识别其它类型(Pearce, 1977)。对于花岗岩类,应综合运用 Nb-Y, Ta-Yb, Rb-(Y+Nb)(Pearce *et al*, 1984; Pearce, 1996)和 Rb-Hf-Ta (Brown *et al*, 1984)来区分火山弧、同碰撞、后碰撞及板内等构造环境。

对于钾质火成岩必须按一定步骤逐步联合使用多个图解(图 6)(Muller *et al*, 1997)。

对于杂(硬)砂岩构造环境判别应按下述步骤(图 7)(Bhatia and Cyook, 1986):用 La-Th; La-Th-Sc; La/Sc-Ti/Zr等图解区分海洋岛弧和大陆弧→用 Th-Sc-Zr/10; Th-Co-Zr/10并结合 Th/Zr和 Th/Sc比值区分活动大陆边缘与大陆弧和海洋岛弧→用 Th-Sc-Zr/10; Th-Co-Zr/10及 La/Y-Sc/Cr, Ti/Zr-La/Sc区分被动边缘与活动陆缘、大陆弧和海洋岛弧(相关图解参见 Bhatia and Cyook, 1986)。

与上述类似,Maniar and Piccdi(1989)提出的花岗岩类常量元素构造环境判别图也是逐步进行,判别过程先后分三步,共联合使用了 7个图解(详见本文后文献)。

4 关于 Nb、Ta亏损与岛弧构造环境关系

随着 ICP-AES和 ICP-MS分析技术的发展,积累了大量有关火成岩的高场强元素 HFSE,特别是 Nb、Ta等元素的资料,它们在岛弧系统岩浆岩中的含量较低,在以原始地幔(primitive mantle)标准化蛛网图(spidergram)中,相对于相邻元素 K、La和 Eu、Dy呈现亏损(图 8)。据此,Ti、Nb、Ta的亏损(TNT异常)成为岛弧构造环境的重要标志之一。

造成岛弧环境岩浆岩 Nb、Ta、Ti的亏损的原因如下:

在一般条件下,岛弧岩浆是通过下述过程产生,即俯冲洋壳在一定深度发生脱水作用形成俯冲带流体,这种流体进入地幔楔使地幔岩石发生部分熔融形成岛弧岩浆,由于 Nb、Ta、Ti等高场强元素在流体中溶解度很低,与此相关,当这种流体上升交代地幔楔时,角闪石发生沉淀,流体中的 Nb、Ta进入角闪石,使流体更亏损 Nb、Ta,因而造成由此形成的岛弧岩浆贫 Nb、Ta、Ti(Ionov and Hofmann, 1995)。另一方面,Ringwood(1990)的实验资料表明,在 80～100km以上的的深度范围,地幔岩中的 Ti、Nb、Ta的主要矿物相金红石是稳定的,因而在岛弧岩浆形成的温、压条件下 Nb、Ta、Ti保留在残余相

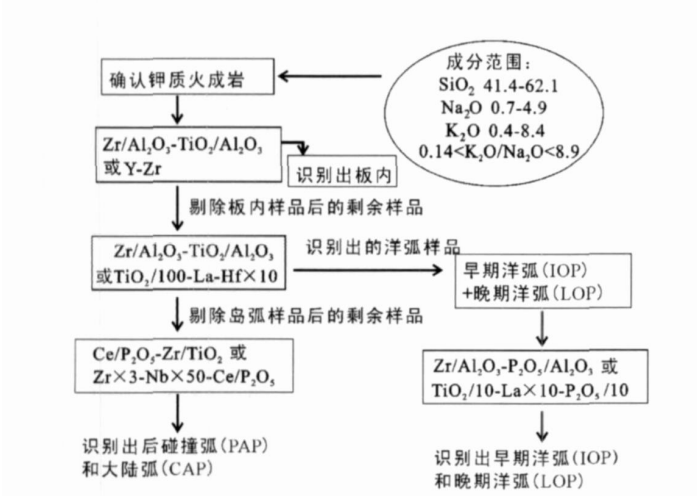


图 6 钾质火成岩构造环境判别步骤图
(据 Muller *et al*, 1997)

Fig. 6 Flow-chart for discriminating tectonic settings for unknown samples of potassic igneous rocks

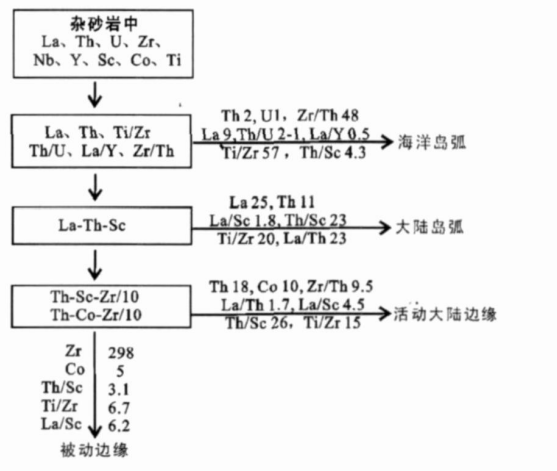


图 7 杂(硬)砂岩构造环境判别框图
(Bhatia and Cyook, 1986)

Fig. 7 Flow-chart for discriminating tectonic settings for unknown samples of greywackes

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

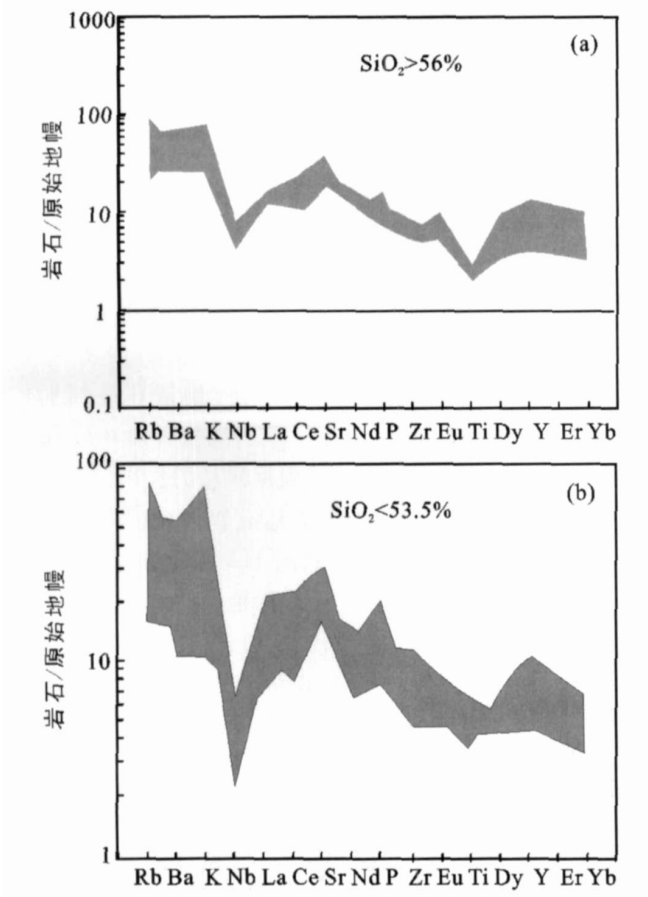


图 8　岛弧岩浆岩的微量元素原始地幔标准化图解

Fig. 8　Primitive mantle-normalized spidergram for trace elements in island arc igneous rocks

金红石、榍石等矿物中,进入熔体很少,造成岛弧岩浆亏损 Nb、Ta、Ti。

造成岛弧岩浆 Nb、Ta、Ti亏损可能有多种过程, Kelemen(2003)总结主要包括 以下 7种过程:地壳中 Fe-Ti氧化物的结晶分离;地壳或地幔中富 Ti含水的硅酸盐,如金云母和角闪石的分异;上升熔体与亏损地幔之间广泛的"色层"分离式相互作用;地幔楔中金红石、榍石相的存在;在由俯冲物质析出的流体中 Nb、Ta相对于 REE及其它元素的不活动性;从俯冲沉积物中继承了低的 Ta/Th和 Nb/Th比值;在俯冲物质部分熔融过程中,金红石作为残留相。Kelemen认为最后一种过程最为可能。

洋岛玄武岩 (OIB)形成深度在 150～300km范围,在这种深度金红石不再是稳定矿物,在部分熔融时进入熔体,因而洋岛玄武岩不出现 Nb、Ta、Ti的亏损。

根据上述特点, Condie提出了 Th/Ta-La/Yb图解 ——Condie图解,区分不同类型的玄武岩 (图 9)。

上述岛弧火成岩的特征可以用 La/Nb比值表

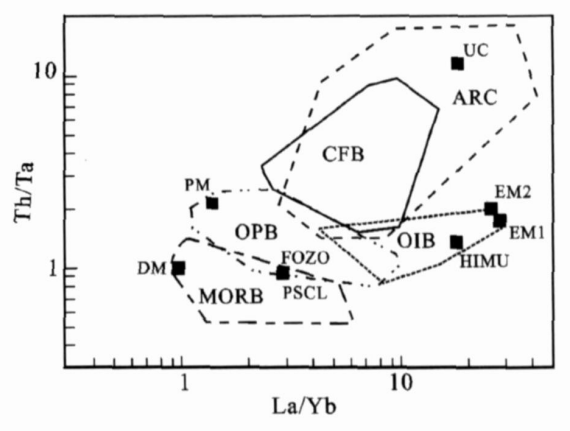


图 9　不同类型的玄武岩的 Th/Ta-La/Yb图解 (Condie, 1997)

Fig. 9　Th/Ta-La/Yb diagram for different types of basalts

示,原始地幔 La/Nb为 0.98～1,岛弧岩浆 La/Nb > 1。Condie(1999)统计了不同构造环境的玄武岩,他以 La/Nb = 1.4为界线,洋中脊玄武岩 (MORB)、洋岛玄武岩 (OIB)和大洋玄武岩 La/Nb < 1.4, Ni > 30 ×10^{-6}, 岛弧玄武岩 La/Nb > 1.4(图 10)。

应该指出的是岛弧玄武岩具有 Nb、Ta、Ti亏损,反过来,出现 Nb、Ta、Ti亏损的并不一定是岛弧环境。如上述,出现 Nb、Ta、Ti亏损可以有多种过程产生,例如,当一个古地幔楔或残留地幔楔岩石,由于后来的构造热事件 (拆沉作用而进入地幔,或受底侵岩浆作用等)而发生部分熔融时,所形成的岩浆也将具有 Nb、Ta、Ti亏损,但这种特点是继承性的,并非反映其岛弧环境。这在具体应用 Nb、Ta、Ti亏损识别构造环境时必须予以注意。

5　微量元素构造环境判别图对成岩过程的示踪意义

微量元素构造环境判别图不仅仅用于岩石形成构造环境的识别,有些图解还可以示踪成岩过程,这是基于构造图解的微量元素参数是岩石源区物质及成岩过程 (交代富集、部分熔融、分离结晶等)的指标。

例如,在 Pearce(1982)建立的 K_2O/Yb ×10^{-4}-Ta/Yb图解中 (图 3),由于 K和 Ta都是不相容元素,所以地幔成分相对于原始地幔的演化将沿图中对角线方向变化,向 D方向代表地幔亏损方向,向 E方向代表地幔富集方向。而在岛弧环境下,由于流体存在, K和 Ta的行为出现明显差异, K在流体中明显富集,因此,图 3中 F方向代表了流体富集方向。基于

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

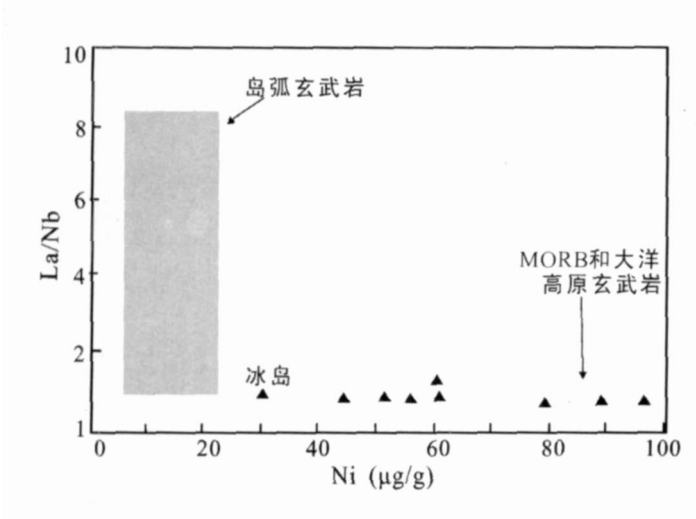


图 10 不同构造环境的玄武岩 (Condie, 1999)

Fig. 10 Basalts in different tectonic settings

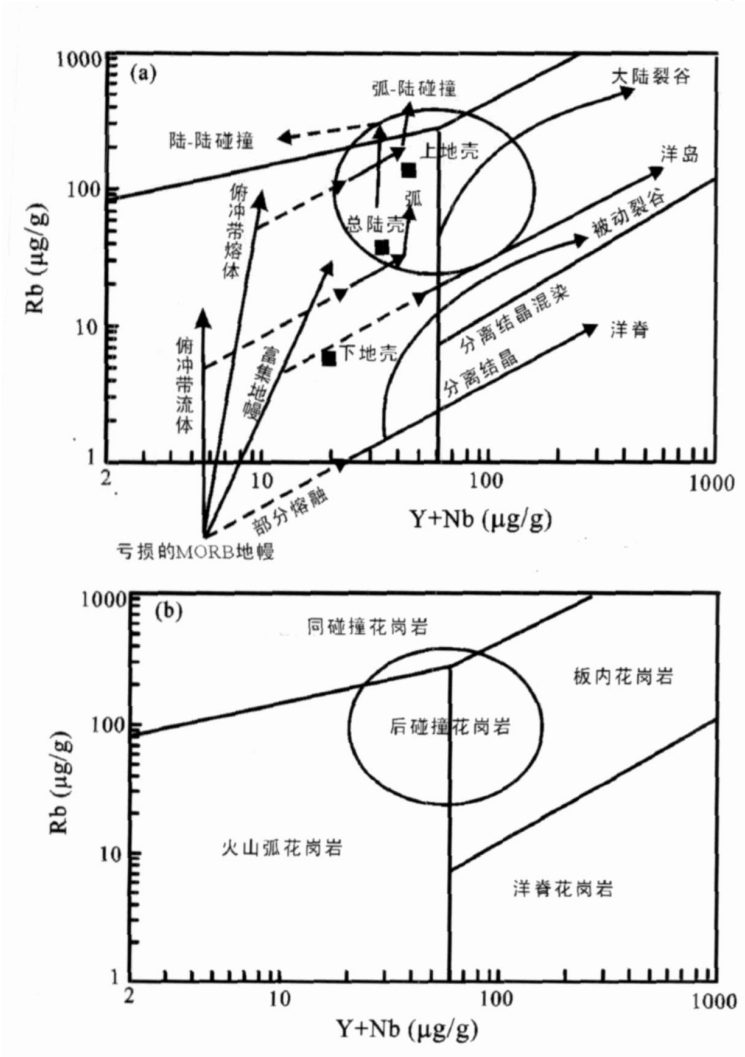


图 11 花岗岩源区及成岩过程 (Pearce, 1996)

Fig. 11 Diagram illustating the source-dependent petrogenetic pathways of granites

此,可将火山弧玄武岩与 MORB和板内玄武岩区分开。

Pearce (1996)对花岗岩类的构造环境判别图解 Rb-(Y+Nb)和源区及成岩过程进行了较系统总结,他指出,作为一级近似,花岗岩岩浆来自两个端元源区——地幔和地壳,一些花岗岩源自这两个纯端元的熔融和分离结晶,然而大多数花岗岩浆来自这两个端元不同比例的混合。

花岗岩 Rb-(Y+Nb)构造环境判别图解中不仅区分了不同构造环境的花岗岩,而且 Pearce还根据样品的投影位置解释花岗岩的源区及其成岩途径 (图 11中的箭头方向)。如图 11a所示,洋脊花岗岩是由亏损的 MORB地幔 DMM经部分熔融和分离结晶作用形成;与被动裂谷有关的花岗岩投影在板内区和洋中脊区的交界处,是由源于 DMM源的岩浆经分离结晶作用和受地壳混染的分离结晶混染作用 (AFC)形成;对于同碰撞环境的花岗岩,其源区有整个地壳 (BCC)以及俯冲带所形成的熔体,对于前者,花岗岩通过陆-陆碰撞形成,而后者则是弧-陆碰撞;对于火山弧型花岗岩,由于上、下和整个地壳成分 (UCC、LCC、BCC)均落在此区,因此成岩过程较复杂:有俯冲脱水而形成流体所发生的熔融;有俯冲板片熔融形成的熔体;还有受交代富集的地幔的熔融。这些岩浆又都有可能经历 AFC过程和 MASH过程 (岩浆混合,混染,分离和均一化过程)。

关于后碰撞构造环境岩浆作用,Pearce (1996)在花岗岩构造环境判别的 Rb-(Y+Nb)图解中划出了后碰撞 (post-collisesion)构造环境的区域,由图 11b可见,它位于同碰撞、火山弧和板内三区域的交界处,表明这种环境是相当广泛的。而由于地壳的加厚使得在这种环境中产生的岩浆具有明显壳-幔相互作用的特点,成分变化范围大,其特点有俯冲的地幔,或火山弧,或板内岩浆的特点,这种复杂性决定了对于投影于该区的岩石不能仅仅用地球化学图解判断其构造环境,还必须结合其地质产出特点。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

将后碰撞作用作为一个独立的构造环境是大陆碰撞及花岗岩类形成研究的重大进展,在此之前并未引起足够注意。1997年在法国召开的"后碰撞岩浆作用"国际会议上,将后碰撞作用单独划分出来,"Lithos"杂志1998年出版了会议专辑,Liegeoiset给出了造山过程图(图12),并对后碰撞岩浆作用做出了总结性论述:碰撞作用是指两个或多个"大陆"板块最初的主碰撞,以大型逆冲断层和高压变质作用为特征。后碰撞是指在时间上比碰撞作用晚,但仍与碰撞作用有关,它通常开始于板内环境,主要海洋已关闭,但伴有大陆块体沿巨大剪切带的大规模水平运动(这与板内环境明显不同)、合拢(docking)、岩石圈拆沉、小型海洋板块的俯冲和裂谷产生等,由于这些事件包括了连续的或幕式的伸展作用,相应地形成了多种类型的岩浆作用,其共同特点是:(1)在体积上,主要是富钾的,特别是高钾钙碱性岩浆最为发育,少量的橄榄玄粗岩。强过铝和碱性-过碱性花岗岩也较多,但相互分离;(2)后碰撞岩浆作用与沿剪切带的大规模水平运动有关;(3)源区含有大量新生的成分(juveneile companent)、地幔的或新形成的火成岩或沉积特征的地壳。这些特点对我们认识后碰撞构造环境很有意义。

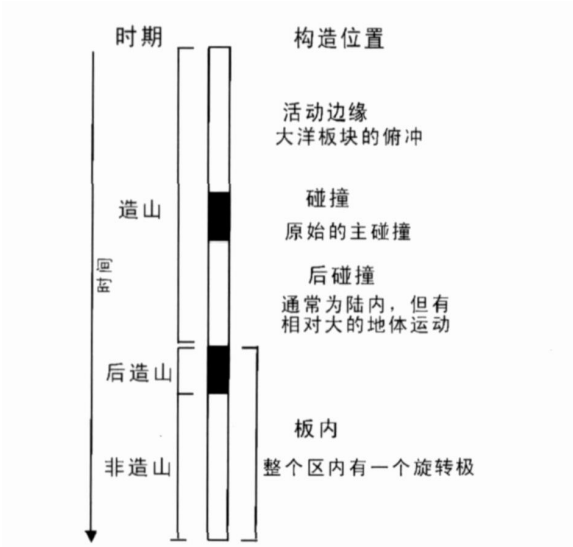


图12　造山过程图(Liegeoiset 1998)

Fig 12　Schematic diagram illustrating orogenic processes

6　岩石构造组合(petrotectonic assemblage)

岩石在地表的分布并非杂乱无章,而是受源区物质成分和所形成的构造环境控制,基于此,不同学者提出了岩石构造组合的相关概念。

从柏林(1979)提出了火成岩的共生组合,即发育于一定的大构造环境中的,时间上和空间上紧密共生的,有共同成因联系的一组火成岩。它包括了地壳演化过程中的、大洋盆地的、造山前和早期造山阶段的、同造山的、晚造山和造山后的多种组合。

Condie(1982)提出了岩石构造组合概念:表征板块边界或特定板块内部环境特征的岩石组合,包括5种类型:①大洋(ocean)组合:为蛇绿岩套,代表古洋残片,构造定位于大陆造山带中;②与俯冲带相关的组合,包括海沟、弧-沟间隙(或弧前盆地),火山岛弧本身和弧后区岩石;③克拉通裂谷组合:不成熟陆相碎屑沉积(以长石砂岩、长石石英砂岩和砾岩为主)和双峰式火山岩(玄武岩-流纹岩);④克拉通组合:成熟的碎屑岩(石英岩、页岩)和碳酸盐、碱性岩,双峰系列;⑤与碰撞相关的组合:长石质砂岩和硬砂岩,发育于前陆盆地,双峰系列钙碱性岩、碱性岩。

在俯冲带,由于俯冲板片发生熔融形成的埃达克岩浆在穿过地幔楔时发生熔体交代或受地幔岩混染而形成埃达克岩及埃达克岩交代的火山岩系列,如富Nb玄武岩(NEB)和高Mg安山岩(HMA)。它们分别显示了板片熔体和弧岩浆的微量元素特征(赵振华等,2004;韩江伟等,2006)。

Condie的岩石构造组合包括了火成岩、沉积岩和变质岩。邓晋福等(1999)将其中的火成岩组合称为火成岩构造组合。岩石构造组合是将岩石的源区成分与构造背景相结合。在这点上是与Pearce建立构造环境地球化学判别图解的原理相一致的,因而,在使用构造环境地球化学判别图时应综合考虑使用岩石构造组合。

此外,近年来发展了"岩石探针(lithoprobe)"研究,即运用岩石的物理化学、同位素和微量元素地球化学资料及相关的理论和方法,从火成岩和其深源包体中获取壳幔结构、物质组成及状态等深部信息,反演壳幔过程。"岩石探针"的研究对判断其构造环境可提供重要信息。

基于上述建立数据库或专家系统是构造环境判别的重要趋势。Pearce(1987)提出了建立火山岩专家系统——多学科协同方法,它包括了火山岩野外产状、岩石学、矿物学及地球化学多方面信息,称为ESCORT。在数据库中,计算机对每一套火山岩中每个样品逐个进行评价和判定构造背景,然后对整个岩套作累计评估,确定所属大地构造背景。Mull-

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

er(1997)提出了钾质火成岩数据库 SHOSH1(2222个样品,24种微量元素,11种主元素)和工作数据库 SHOSH2,并据此构建了钾质火成岩的构造环境判别程序和图解(图 5,图 6)。

7 使用构造环境判别图解应注意的问题

基于上述不同学者所构建的不同类型岩石构造环境判别图的原理,在使用这些图解时必须注意下列问题。

7.1 所研究的岩石类型应与判别图解的岩石类型相同或相近

对玄武岩要使用玄武岩构造环境判别图,不能将花岗岩的构造环境判别图解用于玄武岩。反之亦然。即所使用的判别图的岩石类型要与研究对象对应。目前已发表了基性岩、中性岩、酸性岩和沉积岩的多种构造环境判别图。对于一些特殊类型的岩石,如 A型花岗岩、钾质火成岩,更应当采用相关的专用图解(图 4,5)。

7.2 综合运用多个图解

由于各种构造环境判别图中环境常常有重叠,不是唯一的,因此,应综合运用多个图解以获得统一的构造环境解释。

7.3 特殊类型岩石用特殊的判别程序

如钾质火成岩、沉积岩,应按一定的判别程序,依次进行构造环境识别(图 6,图 7)。

7.4 注意花岗岩类在构造环境判别图中的投影位置

Pearce所建立的花岗岩类构造环境判别图是广义花岗岩(即含 5%以上石英的粗粒火成岩),其图解的基础是将源区与构造环境相联系。随着 Sr、Nd、Pb、Hf同位素和微量元素大量精确资料的积累,花岗岩源区的复杂性已成为共识,因此,在使用时要注意样品投影点在图中的位置(即某一环境区的上、下部位),它们的具体投影位置反映着成岩过程。在某些情况下,投影点位置反映的是源区而不是构造环境。例如,对于在上俯冲带(supra-subduction zone),由于洋中脊发生俯冲,使之在增生杂岩中形成的花岗岩具有增生棱柱中火山沉积岩和 MORB的成分,Y和 Nb含量低,Rb含量较高,投影点落在火山弧区的底部,显然它显示的是源区成分而不是构造环境(洋脊)。又如对于碰撞型花岗岩,当熔融作用的发生是由于没有流体参与的减压作用时,产生的熔体成分近于火山弧区中平均陆壳成分,这种情况下显示的也是源区成分,而不是构造环境(同碰撞)(Pearce, 1996)。

7.5 构造环境地球化学判别图与岩石构造组合,或与“岩石探针”等研究相结合

一个具体的岩石在不同的地球化学(微量元素或主元素)图解中常给出不同的构造环境,必须结合岩石的地质产出特点,特别是上述岩石构造组合或“岩石探针”研究,如在岩石的地质产出中包括了哪些岩石类型及它们的相对数量等,综合进行判断。

7.6 样品的选择

用于构造环境判别分析的样品,一定要是新鲜的、未受后期蚀变的样品。此外,样品一般不应含斑晶。

7.7 注意岩石的时代

几乎所有的岩浆岩形成构造环境的判别,都是建立在地幔不均一性的基础上。目前的研究认为地幔不均一性可达到中元古代,而对于太古宙地幔的不均一性程度尚不清楚,其地幔分异程度比现代差。因此,判别构造环境的地球化学图解对显生宙岩石很适用,对于太古宙岩石应慎重应用。

随着分析方法的不断提高,大量高精度的微量元素和同位素分析数据不断积累。多学科相互渗透、结合,使对地球动力学系统的认识将更加深刻(朱炳泉和崔学军, 2006)。各种岩石的地质学、地球化学数据库和专家系统的建立将不断完善。可以相信,对岩石构造环境的识别将愈来愈接近实际。

参考文献(References):

从柏林. 1979. 岩浆岩与火成岩组合. 北京:地质出版社, 203 - 277.

邓晋福,莫宣学,罗照华,赵海岭,赵国春,曹永清,于学政. 1999. 火成岩构造组合与壳 - 幔成矿系统. 地学前缘, 6(2): 259 - 268.

韩江伟,熊小林,吴金花. 2006. 埃达克岩的 Na亏损及其对地幔交代的指示意义. 大地构造与成矿学, 30(3): 277 - 284.

赵振华,王强,熊小林. 2004. 俯冲带复杂的壳幔作用. 矿物岩石地球化学通报, 23(4): 277 - 284.

赵振华. 1997. 微量元素地球化学原理. 北京:科学出版社, 112 - 129.

朱炳泉,崔学军. 2006. 板块构造学说面临的挑战. 大地构造与成矿学, 30(3): 265 - 274.

Bhatia M R and Cyook K A W. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Cont M in Petrol*, 92: 181 - 193.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Brown G C, Thorpe R S and Webb P C. 1984. The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arc and comments on magma arcs. *J Geol Soc London*, 141: 411 - 426.

Condie K C. 1982. Tectonic and crustal evolution. New York: Pergamon Press, 1 - 310.

Condie K C. 1997. Source of Proterozoic mafic dyke swarms: constraints from Th/Ta and La/Yb ratios. *Precambrian Res*, 81: 3 - 14.

Condie K C. 1999. Mafic crustal xenoliths and the origin of the lower continental crust. *Lithos*, 46: 95 - 101.

Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids, petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20: 641 - 644.

Ionov D A and Hofmann A W. 1995. Nb-Ta-Ti-rich mantle amphiboles and micas: implications for subduction-related metasomatic trace element fractionations. *EPSL*, 131: 341 - 356.

Kelemen P. 2003. One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs with emphasis on primitive andesite and lower crust. In: Holland H D and Turekian K K (eds). Treatise on geochemistry, Amsterdan: Elsevier, 3: 612 - 615, 626 - 627.

Liegeoiset J P. 1998. Some words on the post-collisional magmatism. *Lithos*, 45: XV - XV II.

Maniar D P and Piccdi P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of American Bulletin*, 101: 635 - 643.

Meschede M. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chemi Geol*, 56: 207 - 218.

Muller D, Rock N M S and Groves D I. 1992. Geochemical discrimination between shoshonitic and potassic volcanic rocks from different tectonic settings: a plot study. Mine. *Petrol*, 46: 259 - 289.

Muller D and Groves D. 1997. Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization. Berlin: Springer, 11 - 40.

Pearce J A. 1982. Trace elements characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe R S (ed). Andesites. Wiley, New York: 525 - 548.

Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J Petrol*, 25: 956 - 983.

Pearce J A. 1996. Source and settings of granitic rocks. *Episodes*, 19: 120 - 125.

Ringwood A E. 1990. Slab-mantle interactions: Petrogenesis of intraplate magmas and structure of the upper mantle. *Chemical Geology*, 82: 187 - 207.

Thieblemont D and Tegyey M. 1994. Use discrimination geochimiwue des roches differenciees temoin de la diversite dòrigine et de situation tectonique des magmas calco-alkalins. *C R Acad Sci Paris*, 319: 87 - 94.

HOW TO USE THE TRACE ELEMENT DIAGRAMS TO DISCRIMINATE TECTONIC SETTINGS

ZHAO Zhenhua

(Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, GD 510640, *China)*

Abstract: There are several misunderstanding or incorrect uses of the trace element diagrams for discriminating the tectonic settings of different rocks. According to the constructive principles of these diagrams, the following aspects must be thought carefully: the rock types to be studied must be the same or nearly the same as those that can be discriminated by the diagram; To avoid mixed or incorrect signals that could be produced, two or more such diagrams shall have to be jointly used; For special rock types, such as A-type granites or potassic igneous rocks, special discriminative diagrams have to be determined and selected respectively; The samples to be studied can not be altered; In general, the diagrams must be used carefully with Archean samples; The petrotectonic assemblage or an expert system are recommended to be used together with the discrimination diagrams. In addition, the discrimination diagrams may tell us more about petrogenetic processes and sources besides tectonic settings.

Keywords: diagram for discriminating tectonic settings; trace element; post-collision; alkali-rich granite; potassic igneous rock

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net