

玄武岩类形成的大地构造环境 Ta、Hf、Th、La、Zr、Nb 比值对比判别

李永军^{1,2}, 李甘雨^{1,2}, 佟丽莉^{1,2}, 杨高学^{1,2}, 王 冉^{1,2}

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054;

2. 长安大学 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘 要:玄武质岩浆见于板块构造演化的全过程和各个重要阶段,是所有火成岩中最主要的构造地球化学指示剂,因此,玄武岩类相关元素图解和比值成为研究火成岩成岩作用和形成构造环境判别的首选对象。Ta、Hf、Th、La、Zr、Nb 都是高场强元素和较强不相容元素,由于地球化学性质的相似性和在玄武岩类成岩过程中的规律性变化,所以它们是玄武岩类成因研究和构造环境判别图解中使用频率最高的元素,而且两两元素含量之间的比值能较好地地区分其形成时的构造环境。在前人发明的玄武岩类 Th/Hf-Ta/Hf、Th/Zr-Nb/Zr 及 La/Zr-Nb/Zr 双对数判别图解基础上,运用这 6 个元素两两组对的 Ta/Hf、Th/Ta、Th/Hf、Nb/Zr、Th/Nb、La/Nb 值,建立比值判别表,极好地区分了几种最常见的各种构造环境中有关的玄武岩类。该比值判别表是对双对数判别图解的极好补充。

关键词:玄武岩; Ta/Hf; Th/Ta; Th/Hf; Nb/Zr; Th/Nb; La/Nb; 比值判别; 构造环境

中图分类号:P595

文献标志码:A

Discrimination of Ratios of Ta, Hf, Th, La, Zr and Nb for Tectonic Settings in Basalts

LI Yong-jun^{1,2}, LI Gan-yu^{1,2}, TONG Li-li^{1,2}, YANG Gao-xue^{1,2}, WANG Ran^{1,2}

(1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Basaltic magma, which is found in whole process of plate tectonic evolution and the critical stages, is a most important tectonogeochemical indicator in all igneous rocks. Therefore, the diagrams and ratios of related elements in basalts become the first choice to investigate the igneous diagenesis and tectonic setting. Ta, Hf, Th, La, Zr and Nb, which are high-field strength elements and stronger incompatible elements, have similar geochemical properties and regular changes in basaltic diagenesis, thus, they are most frequently used in basalt genesis and discrimination diagrams of tectonic setting. Moreover, the ratios of contents between the each one of elements can better distinguish the tectonic settings of formation. Based on the double-log discrimination diagrams of Th/Hf-Ta/Hf, Th/Zr-Nb/Zr and La/Zr-Nb/Zr in basalt yielded by previous research, the ratios of Ta/Hf, Th/Ta, Th/Hf, Nb/Zr, Th/Nb, La/Nb values were proposed to distinguish the basalts in various common tectonic settings, and the ratio

收稿日期:2015-02-02

基金项目:国家自然科学基金项目(41273033,41202044,40534020)

作者简介:李永军(1961-),男,甘肃天水人,教授,博士研究生导师,理学博士,E-mail:yongjunl@chd.edu.cn.

discrimination table was put forward. The table extremely distinguishes basalt in most common variety of tectonic environments and is a great supplement for the double-log discrimination diagrams.

Key words: basalt; Ta/Hf; Th/Ta; Th/Hf; Nb/Zr; Th/Nb; La/Nb; ratio discrimination; tectonic setting

0 引言

玄武岩在全球分布十分广泛,其岩浆的形成与全球构造(如裂谷扩张、板块俯冲消减、地幔的深部作用等过程)最为密切^[1-2],因而产出于多种板块构造演化环境中,并且不同大地构造环境一般具有较为特定的岩石组合、钾质或钠质类型以及基本固定的建造系列。同时,大量高温高压试验成果和地质、岩相及岩石化学资料已经证实,玄武质岩浆是由地幔橄榄岩部分熔融形成的^[3-7],因而几乎所有的玄武岩源区直接源于上地幔,因此,研究玄武岩对于反演地幔物质成分,分析构造环境和地球的深部动力学均具有重要意义^[8-10]。

与中酸性岩浆显著不同的是,玄武质岩浆类型复杂多样,并且见于板块构造演化的全过程和各个重要阶段,自然成为研究构造地球化学的主要指示剂。玄武质岩浆的主要源区包括岩石圈地幔、地幔热柱、软流圈和地壳四大端元^[11-12]。迄今为止,洋中脊玄武岩(MORB)型岩浆还未见于大陆构造环境,并且大陆玄武岩的地球化学性质有别于大洋玄武岩;其差异表明,大陆玄武质岩浆的形成除软流圈^[13]、地幔热柱^[14-16]外,一定有其他源的参与(如岩浆混合、岩浆混染)^[16-17]。由于不同端元组分对岩浆生成的相对贡献量不同,使得大陆玄武岩的地球化学性质更为复杂和具有多样性^[18],所以识别和区分不同大地构造环境中的玄武岩类,成为地球化学家关注的主要研究内容^[19-22],从而运用玄武岩的相关元素进行图解和相关比值判别大地构造环境,成为所有火成岩类的首选研究对象。

从20世纪80年代开始,地质学家利用微量元素地球化学特征判别岩浆形成的大地构造环境和示踪岩浆源区的化学性质,诞生了许多判别方法,尤其是发明了众多的地球化学判别图解^[23-26]。在所有岩石类型的构造环境判别图解中,玄武岩类的图解判别最多。经典的图解主要有 Th-Hf/3-Ta 三角图解[图 1(a)]^[27]、Ti/100-3Y-Zr 三角图解[图 1(b)]^[28]、3Tb-Th-2Ta 三角图解[图 1(c)]^[29]、Nb/Th-Nb 图解[图 1(d)]^[30]、Th/Yb-Ta/Yb 图解[图 1(e)]^[31]和

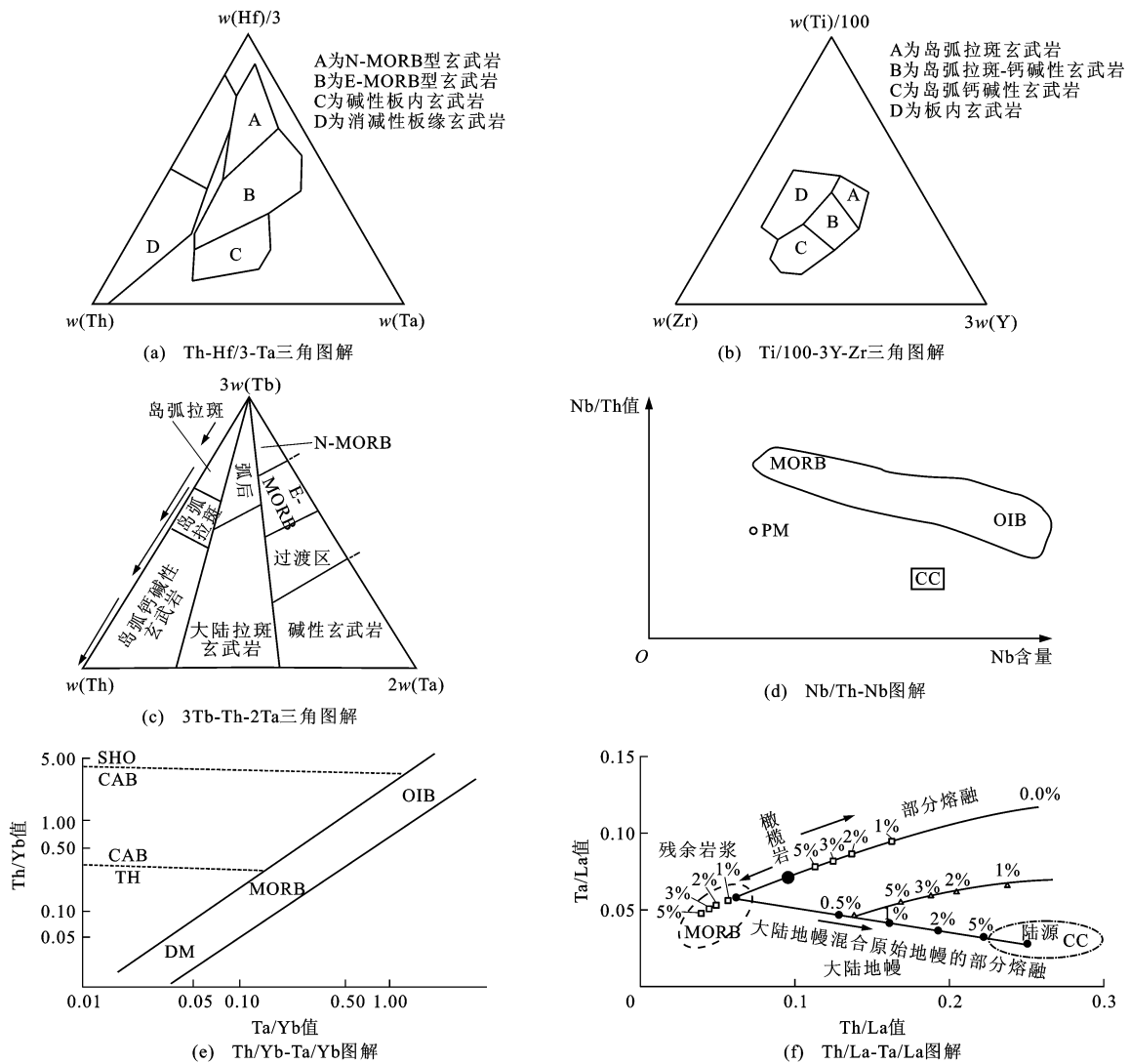
Th/La-Ta/La 图解[图 1(f)]^[32]等。

通过大量精细对比研究发现,多元素图解、元素与同位素配套的图解等相对量少的元素(包括氧化物)图解可信度更高,从而能更精细地区分不同大洋环境的玄武岩类,其中最有效的多元素图解以稀土元素配分模式[图 2(a)]^[33]和大离子亲石元素蛛网图[图 2(b)~(d)]^[31]为代表。

对比上述各经典图解不难看出,在进行玄武岩类构造环境判别中,Ta、Hf、Th、La、Zr、Nb 这 6 个元素是地球化学研究和成因判别图解中使用率最高的元素。

综合分析前人研究成果发现,图解判别是当前大多数学者最易接受和最常使用的方法,而运用比值和对比表进行判别分析的可借鉴资料较少。通常情况下,拿到一批分析数据后,需先选择某些图解模版进行图解,并经综合读图分析后凝练出构造环境信息。当分析数据在多个数量级区间变化时,还要使用对数坐标进行成图。很多图解首先要借助 Excel 等软件进行成图,之后通过 Coreldraw 等软件将 Excel 软件成图与已有的构造环境模版图套合(因为大多数成图软件中无现成的构造环境等模版图,所以只有套合才能将 Excel 软件成图与模版图上的构造环境信息有机联合),从而获得其构造环境信息。这一过程相对繁琐和复杂。对于某个或多个具体数据而言,只需经过简单计算(有时可进行心算估计),借助比值判别表速查可粗判该数据的构造环境信息,有用时再进行精细计算、成图、图解套合,无用时或数据的比值不在关注的构造环境信息范围之内时则弃之(无需精细计算、成图、图解套合)。这一过程中,简化的比值判别表较之精细的图解及套合图解过程则快速有效,实用性更强,因此,设计出有效的比值判别表对地球化学研究有极好的实用性和推广性。

考虑到前人已有的 Th/Hf-Ta/Hf、Th/Zr-Nb/Zr 及 La/Zr-Nb/Zr 双对数判别图解是运用大量数据统计与检验确认有效这一事实,本文综合分析并提取了 Ta/Hf、Th/Ta、Th/Hf、Nb/Zr、Th/Nb、La/Nb 值共 6 组比值信息,建立比值判别对比表,极好地区分了几乎最常见的各种构造环境中有关的玄武岩类。



N-MORB 为正常型洋中脊玄武岩;E-MORB 为异常型洋中脊玄武岩;OIB 为洋岛玄武岩;SHO 为钾玄武岩;CAB 为钙碱性玄武岩;TH 为大洋拉斑玄武岩;DM 为亏损地幔;PM 为原始地幔;CC 为大陆地壳;图(f)中百分比为部分熔融程度

图 1 玄武岩类大地构造环境主要判别及部分熔融图解

Fig. 1 Partial Melting Diagram and Mainly Discrimination for Tectonic Settings in Basalts

1 Ta、Hf、Th、La、Zr、Nb 的地球化学性质

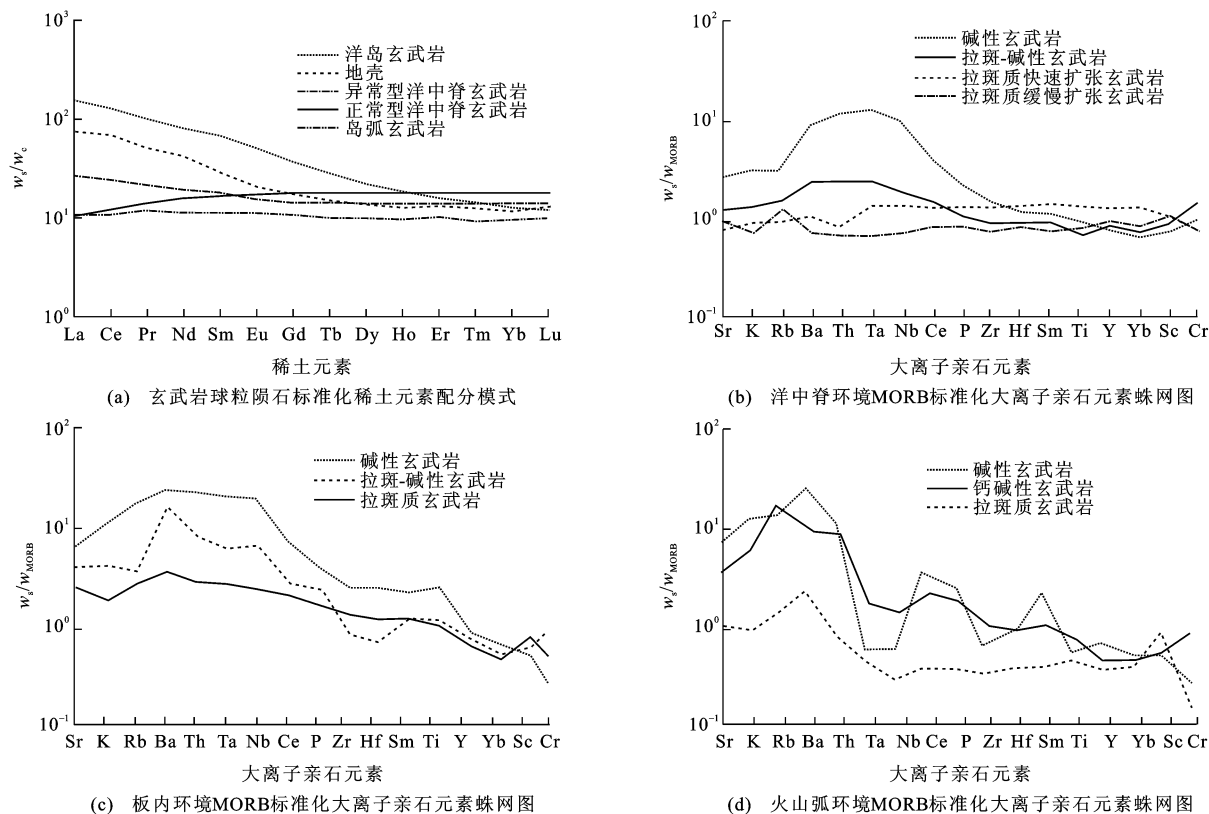
Ta、Hf、Th、La、Zr、Nb 都是高场强元素。由于这 6 个元素都是不相容元素(Th、Ta、La、Nb 强不相容, Zr、Hf 弱不相容),在分离结晶过程中含量都在同步增加,所以两两元素含量之间的比值显示有规律性的变化。这一特征使得在研究中对于玄武岩成分是否接近原始岩浆成分的要求大为放宽,即 Ta、Hf、Th、La、Zr、Nb 的数据能够加以利用的岩石除原生岩浆岩外,一些分离结晶程度较低的岩石也可以使用。

Nb 是强不相容元素,在地幔-岩浆间的总分配系数最小,故低度部分熔融易进入熔体,而分离结晶时会一直保存在残余熔体中。研究表明:富集型洋

中脊玄武岩(P-MORB)地幔源中 Nb 含量高于 N-MORB 地幔源,因此,Nb 又是地幔不均一性的指示剂^[34];Nb 亏损可提供有关地壳性质和玄武质岩石受其混染的信息。

Zr 是惰性元素。弧后盆地玄武岩岩浆的源可能有活性元素的富集,它们随含水流体相进入其中,故 Zr 含量的标准化可以充分表现从 Zr 发端的活动性元素富集的程度^[34]。

Ta 和 Hf 是耐熔的高场强元素,Th 是耐熔大离子亲石元素。在深部作用过程(如地幔分离、地幔部分熔融、岩浆分离结晶、地壳混染等)中,在岩浆相、流体相或地幔分离后的活动分离相,这些元素含量有时会发生几个数量级的变化,用其绝对含量恢复所研究岩石玄武岩类岩浆源区成分从而判别其大地构造环



w_s 为样品含量; w_c 为球粒陨石含量; w_{MORB} 为 MORB 含量; 图(a)引自文献[20]; 图(b)~(d)引自文献[18]

图2 各典型构造环境中玄武岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式及 MORB 标准化大离子亲石元素蛛网图

Fig. 2 Chondrite-normalized REE Pattern and MORB-normalized Trace Element Spider Diagrams of

Basalts from Various Typical Tectonic Settings

境显然是困难的,但由于不相容性,其亲岩浆性的变化是同步的,两两元素含量之间的比值在地幔部分熔融过程中只有很小的变化,在岩浆分离结晶过程中基本不变。相对原始岩浆而言, Ta/Hf 值和 Th/Hf 值差异大被解释为源区成分不同引起的^[35]。

La 为强不相容元素,易溶于水,地球化学性质活泼,在岩石中的原始丰度、分布形式、分散或富集规律、迁移特性等行为很独特^[36]。La、Nb、Zr 是一组耐熔强亲岩浆元素,其含量相互之间的比值关系可用来恢复深部作用的地球化学过程^[36]。

上述 6 个元素地球化学性质相似,在岩浆演化过程中含量变化基本同步,元素含量之间的比值在地幔部分熔融过程中只有很小的变化,在岩浆分离结晶过程中基本不变,因此,它们可用来恢复岩浆源区成分,进而判别岩石形成的大地构造环境。

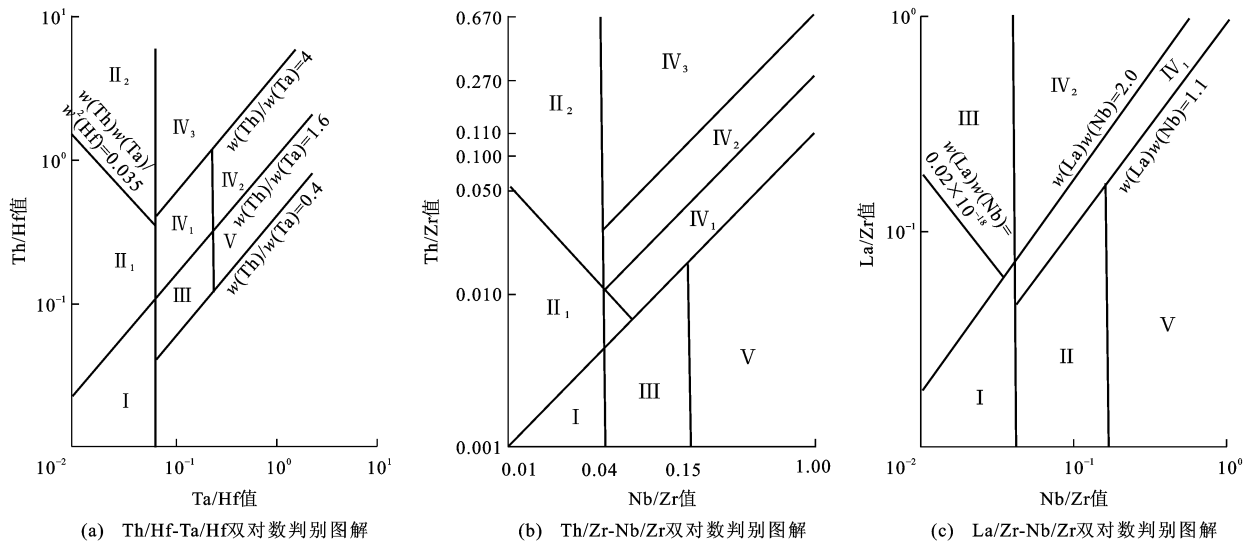
2 Ta、Hf、Th、La、Zr、Nb 含量的比值对比判别

依据上述地球化学特性,汪云亮等根据世界典型大地构造环境区玄武岩类的 Th、Ta、Hf 最新数

据研究发现,原生岩浆岩的 Ta/Hf 值和 Th/Hf 值直接反映的是其源区的 Th、Ta、Hf 分异特征,且大体等于其源区的值;在此基础上,又提出了玄武岩类形成的大地构造环境 Th/Hf-Ta/Hf 双对数判别图解[图 3(a)]^[37]。

此后,孙书勤等进一步提出了 Th/Zr-Nb/Zr 双对数判别图解,这一图解与之前的 Th/Hf-Ta/Hf 双对数判别图解相互弥补与验证,为玄武岩岩石的构造环境判别增加了新的图解方法[图 3(b)]^[38]。武莉娜等用同样的研究思路和方法提出了玄武岩大地构造环境 La/Zr-Nb/Zr 双对数判别图解[图 3(c)]^[36]。随后,孙书勤等对板块汇聚边缘玄武岩的判别方法及其演化趋势进一步讨论,使得上述判别图解在具体应用中的结果更加精准^[39]。

遗憾的是,当使用这些图解时,必须进行精确投图才能确认样品的投点区,特别麻烦的是两图均是对数坐标,而且坐标值又是两两元素含量的对数比值,大大影响了直观判别特性,不能达到直观、快速判别这一目的。本文在认真分析和研究原作者发明双对数判别图解的基本原理基础之上,重新整理了



I 为板块发散边缘 N-MORB 区;II 为板块汇聚边缘,其中 II₁ 为大洋岛弧玄武岩区,II₂ 为陆缘岛弧及陆缘火山弧玄武岩区;III 为大洋板内洋岛、海山玄武岩区及 T-MORB、E-MORB 区;IV 为大陆板内,其中 IV₁ 为陆内裂谷及陆缘裂谷拉斑玄武岩区,IV₂ 为陆内裂谷碱性玄武岩区,IV₃ 为大陆拉张带(或初始裂谷)玄武岩区;V 为地幔热柱玄武岩区;图(a)引自文献[37];图(b)引自文献[38];图(c)引自文献[36]

图 3 玄武岩类大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf、Th/Zr-Nb/Zr 及 La/Zr-Nb/Zr 双对数判别图解

Fig. 3 Double-log Discrimination Diagrams of Th/Hf-Ta/Hf, Th/Zr-Nb/Zr and La/Zr-Nb/Zr for Tectonic Settings in Basalts 相关数据与比值,新提出了综合对比表(表 1),从而 通过简单的速查和对比淘汰方法,运用表 1 功能获 使应用者无须进行较为麻烦的精确投图过程,而是 得某样品可靠的构造环境信息。

表 1 玄武岩类大地构造环境的 Ta、Hf、Th、La、Zr、Nb 比值判别

Tab. 1 Discrimination of Ratios of Ta, Hf, Th, La, Zr and Nb for Tectonic Settings in Basalts

构造环境	主要玄武岩类型	Ta/Hf 值		Th/Ta 值	Th/Hf 值		Nb/Zr 值		Th/Nb 值		La/Nb 值	
板块发散 边缘	N-MORB	<0.1		<1.6	<0.2		<0.04		<0.11		<2	
	E-MORB,T-MORB,OIB	0.1~0.3										
大洋板内	大洋拉斑	>0.1	0.1~0.3	<1.6			>0.04	0.04~0.15	<0.11		<1.11	
	大洋碱性		>0.3					>0.15				
板块汇聚 边缘	大洋岛弧	<0.1		>1.6	<0.1	Th×Ta/Hf ² 值小于 0.035	<0.04		>0.11	Th×Ta/Zr ² 值 小于 0.000 5	>2	La×Nb/Zr ² 值 小于 0.02
	陆缘岛弧陆缘 火山弧					Th×Ta/Hf ² 值 大于 0.035				Th×Ta/Zr ² 值 大于 0.000 5		La×Nb/Zr ² 值 大于 0.02
大陆板内	大陆拉斑	>0.1	0.1~0.3	>1.6			>0.04	0.04~0.15	>0.11(但小于 0.67)		>1.11	>1.11
	大陆碱性		>0.3					>0.15				
	陆-陆碰撞带		相似于大陆裂谷					一般大于 10				>0.04
大陆裂谷	典型裂谷	>0.1		1.6~4	>0.04		0.11~0.27		1.11~2			
	陆内裂谷或初始裂谷			>4(范围为 4~10)								>0.27,且小于 0.67
地幔热柱	碱性	>0.3		变化大			>0.15		<0.11		<1.11	

注:Ta/Hf 值表示 $w(\text{Ta})/w(\text{Hf})$, Th/Ta 值、Th/Hf 值、Nb/Zr 值、Th/Nb 值、La/Nb 值依此类推;Th×Ta/Hf² 值表示 $w(\text{Th})w(\text{Ta})/w^2(\text{Hf})$;La×Nb/Zr² 值表示 $w(\text{La})w(\text{Nb})/w^2(\text{Zr})$ 。

本文用表格化表达这一分类的相关比值与 Th/Hf-Ta/Hf 双对数判别图解互补,更便于读者使用。需要说明的是,汪云亮等在提出 Th/Hf-Ta/Hf 双对数判别图解时,认为成图数据必须满足 3 个条件^[37]:①岩石类型为玄武岩及玄武安山岩($w(\text{SiO}_2) \leq 56\%$);② $w(\text{MgO}) \geq 8\%$;③ $w(\text{Cr}) \geq 200 \times 10^{-6}$ 。

而笔者在应用此图进行新疆西天山、西准噶尔地区近 300 个玄武岩和玄武安山岩($w(\text{SiO}_2) \leq 56\%$)样品进行图解与构造环境判别时,发现样品只要符合汪云亮等提出的玄武岩和玄武安山岩 $w(\text{SiO}_2) \leq 56\%$ ^[37],MgO、Cr 含量无需受前述条件限定,所获得的构造环境信息就与其他方法获得的综合判别相

印证。其中, $w(\cdot)$ 为元素或化合物含量(质量分数,下同)。

由表1看出:Th/Ta 值在区分大洋与大陆构造演化中有极好的显示,与大洋演化密切相关的玄武岩类(板块发散边缘和大洋板内)Th/Ta 值小于1.1,而所有弧构造及陆内和地幔热柱有关的玄武岩类Th/Ta 值大于1.1;Th/Nb 值也对各类玄武岩有较好的区分性,板块离散边缘、大洋板内和地幔热柱有关的玄武岩类Th/Nb 值小于0.11,而所有弧构造及陆内有关的玄武岩类Th/Nb 值大于0.11;板块离散边缘、板块汇聚边缘的Nb/Zr 值小于0.04,而其余构造环境中有关的玄武岩类Nb/Zr 值大于0.04。这6个元素两两组对的Ta/Hf、Th/Ta、Th/Hf、Nb/Zr、Th/Nb、La/Nb 值极好地区分了几乎最常见的各种构造环境中有关的玄武岩类,且比值较之相对复杂的双对数判别图解更易查找和对比操作,因而是对Th/Hf-Ta/Hf、Th/Zr-Nb/Zr 及La/Zr-Nb/Zr 双对数判别图解的极好补充。只需对上述6组比值数据进行简单计算,采用对比和排除法查表1,即可获得所研究样品的构造判别信息。同时,对前人没有进行相应双对数判别图解的成果,也能通过本文设计的比值对比表(表1),查找并提取构造环境信息。

Th/Zr-Nb/Zr、Th/Hf-Ta/Hf 和 La/Zr-Nb/Zr 双对数判别图解分别是武莉娜等、汪云亮等、孙书勤等统计了马尼安纳岛玄武岩-玄武质安山岩,智利南安底斯山玄武岩、玄武质安山岩,日本琉球岛弧玄武岩,哥伦比亚Gorgona 岛科马提质玄武岩、苦橄岩,澳大利亚昆士兰省沿海地区中部岩墙群玄武岩、玄武质安山岩,北大西洋和东太平洋科科斯洋脊玄武岩,北大西洋中脊E-MORB,原始地幔等约10 000组世界上未受污染的玄武岩类的数据而成图的^[36-39],因而是建立在大量准确分析数据、有代表性构造环境、元素地球化学行为被充分了解这一基础上获得的图解。本文据此提取的比值对比数据表(表1)可靠性也是可以肯定的。

更为重要的是,Th/Zr-Nb/Zr、Th/Hf-Ta/Hf 和 La/Zr-Nb/Zr 双对数判别图解都是3个元素构成的,而本文建立的比值对比表综合了这6个元素的两两元素或两个以上元素含量比值,要比其中单一的一个3元素图解获得的构造环境信息更可信。当某个投点落入图解分界线上或是两个构造环境的重叠区时,运用比值对比表可更有效地加以区分和判别。

3 结 语

(1)Th/Zr-Nb/Zr、Th/Hf-Ta/Hf 和 La/Zr-Nb/Zr 双对数判别图解是建立在准确分析数据、有代表性构造环境的约10 000组世界典型地区未受污染的玄武岩类构造信息提取基础上研制的图解。据此获得的6组Ta/Hf、Th/Ta、Th/Hf、Nb/Zr、Th/Nb、La/Nb 值极好地区分了几乎最常见的各种构造环境中有关的玄武岩类。

(2)6组比值判别对比表较之相对复杂的双对数判别图解更易查找判别和对比操作,因而是对Th/Hf-Ta/Hf、Th/Zr-Nb/Zr 及La/Zr-Nb/Zr 双对数判别图解的极好补充。尤其当某个投点落入图解的分界线上或是两个构造环境的重叠区时,运用比值判别对比表可更有效地加以区分和判别。6组比值判别对比表实用性强,可操作性简易,尤其在初步筛选数据和粗判其构造环境信息时快速有效,是对已有对数判别图解的极好补充。

(3)前人提出的3个双对数判别图解玄武岩数据必须满足 $w(\text{MgO}) \geq 8\%$ 和 $w(\text{Cr}) \geq 200 \times 10^{-6}$,但本文提出的6组比值判别对比表可能不受此条件限制。目前为止,将近年来在西天山、西准噶尔地区调研所分析的全部玄武岩数据(约2 000组)进行检验,未发现例外情况,即运用6组比值判别对比表检验约2 000组玄武岩数据,其构造环境信息与3个双对数判别图解获得的构造环境信息相吻合,但有约300组MgO、Cr 含量并不满足前人条件。因此,是否必须满足 $w(\text{MgO}) \geq 8\%$ 和 $w(\text{Cr}) \geq 200 \times 10^{-6}$,有待更多数据进行检验,这也是本文存在的问题之一。

参 考 文 献:

References:

- [1] 夏林圻. 造山带火山岩研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(3): 225-232.
XIA Lin-qi. A Study of Volcanic Rocks in Orogenic Belts[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2001, 20(3): 225-232.
- [2] 张树明, 王方正. 玄武岩在研究岩石圈深部过程及构造背景中的应用[J]. 地球科学进展, 2002, 17(5): 685-692.
ZHANG Shu-ming, WANG Fang-zheng. Basalt's Action on Research Geosphere Deep-course and Structural Setting [J]. Advances in Earth Science, 2002, 17(5): 685-692.

- [3] O'HARA M J. Primary Magmas and the Origin of Basalts[J]. *Scottish Journal of Geology*, 1965, 1: 19-40.
- [4] ITO K, KENNEDY G C. An Experimental Study of Basalt-garnet Granulite-eclogite Transition[J]. *American Geophysical Union*, 1971, 14: 303-314.
- [5] GREEN D H. Experimental Melting Studies on a Modal Upper Mantle Composition at High Pressure Under Water-saturated and Water-undersaturated Conditions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1973, 19(1): 37-53.
- [6] YODER J R H S. Generation of Basaltic Magma[R]. Washington DC: National Academy of Science, 1976.
- [7] 林景仟. 岩浆岩成因导论[M]. 北京: 地质出版社, 1987.
LIN Jing-qian. Discussion About Magma Rocks Formation[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987.
- [8] 瞿建威, 范蔚茗, 王岳军, 等. 松潘—甘孜地块丹巴二叠纪玄武岩的主、微量元素和 Sr-Nd 同位素研究: 岩石成因与构造意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2008, 32(2): 226-237.
ZI Jian-wei, FAN Wei-ming, WANG Yue-jun, et al. Geochemical and Sr-Nd Isotopic Study on Permian Basalts from Danba Area, Songpan-Ganzi Terrane: Petrogenesis and Tectonic Implication[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2008, 32(2): 226-237.
- [9] 曾 罡. 华北克拉通东南缘新生代碱性玄武岩的成因[D]. 南京: 南京大学, 2011.
ZENG Gang. Genesis of Cenozoic Alkaline Basalts in the Southeastern Margin of North China Craton[D]. Nanjing: Nanjing University, 2011.
- [10] 王智琳, 许德如, 吴传军, 等. 海南岛晚古生代洋岛玄武岩(OIB型)的发现及地球动力学暗示[J]. *岩石学报*, 2013, 29(3): 875-886.
WANG Zhi-lin, XU De-ru, WU Chuan-jun, et al. Discovery of the Late Paleozoic Ocean Island Basalts (OIB) in Hainan Island and Their Geodynamic Implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(3): 875-886.
- [11] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implication for Mantle Composition and Processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42: 303-345.
- [12] SUN S S, MCDONOUGH W F, EWART A. Four Component Models for East Australian Basalt [M]// JOHNSON R W. Intraplate Volcanism in Eastern Australia and New Zealand. Cambridge: Cambridge University Press, 1989: 333-347.
- [13] GIBSON S A, THOMPSON R N, LEAT P T, et al. Asthenosphere-derived Magmatism in the Rio Grande Rift, Western USA: Implications for Continental Break-up[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1992, 68: 61-89.
- [14] KERR A C, SAUNDERS A D, TARNEY J, et al. Depleted Mantle-plume Geochemical Signatures: No Paradox for Plume Theories[J]. *Geology*, 1995, 23(9): 843-846.
- [15] JACKSON I. The Earth's Mantle: Composition, Structure and Evolution[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [16] ARNDT N T, CHRISTENSEN U. The Role of Lithospheric Mantle in Continental Flood Volcanism: Thermal and Geochemical Constraints[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(B7): 10967-10981.
- [17] WILSON M, DOWNES H. Tertiary-Quaternary Extension-related Alkaline Magmatism in Western and Central Europe[J]. *Journal of Petrology*, 1991, 32(4): 811-849.
- [18] TAYLOR R S, MCLENNAN M S. The Geochemical Evolution of the Continental Crust[J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33(2): 241-265.
- [19] 张鸿翔, 徐志方, 马英军, 等. 大陆溢流玄武岩的地球化学特征及起源[J]. *地球科学*, 2001, 26(3): 261-268.
ZHANG Hong-xiang, XU Zhi-fang, MA Ying-jun, et al. Geochemical Features and Origin of Continental Flood Basalts[J]. *Earth Science*, 2001, 26(3): 261-268.
- [20] 夏 换, 陈根文, 刘 群, 等. 西天山吐拉苏盆地大哈拉军山组火山岩地球化学特征及构造意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2011, 35(3): 429-438.
XIA Huan, CHEN Gen-wen, LIU Qun, et al. Geochemical Characteristics of the Dahalajunshan Formation Volcanic Rocks in the Tulasu Basin of Western Tianshan and Its Tectonic Implications[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2011, 35(3): 429-438.
- [21] 汪云峰. 云南丽江地区二叠纪玄武岩的岩石学和地球化学研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013.
WANG Yun-feng. Studies on Petrology and Geochemistry of the Permian Basalts in Lijiang Area, Yunnan Province[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.
- [22] 钱 青, 王 焰. 不同构造环境中双峰式火山岩的地球化学特征[J]. *地质地球化学*, 1999, 27(4): 29-32.
QIAN Qing, WANG Yan. Geochemical Characteristics of Bimodal Volcanic Suites from Different Tectonic Settings[J]. *Geology-geochemistry*, 1999, 27(4):

- 29-32.
- [23] 张招崇,王福生.一种判别原始岩浆的方法:以苦橄岩和碱性玄武岩为例[J].吉林大学学报:地球科学版,2003,33(2):130-134.
ZHANG Zhao-chong, WANG Fu-sheng. A Method for Identifying Primary Magma: Examples from Picrite and Alkali Basalts[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2003, 33(2): 130-134.
- [24] 朱振华,杨洪之.玄武岩的大地构造岩石化学特征与判别的初步研究[J].矿物岩石,1992,12(4):57-65.
ZHU Zhen-hua, YANG Hong-zhi. Geotectonic Petrochemical Features of Basalts and Their Discriminations [J]. Mineralogy and Petrology, 1992, 12(4): 57-65.
- [25] 李曙光.蛇绿岩生成构造环境的 Ba-Th-Nb-La 判别图[J].岩石学报,1993,9(2):146-157.
LI Shu-guang. Ba-Nb-Th-La Diagrams Used to Identify Tectonic Environments of Ophiolite[J]. Acta Petrologica Sinica, 1993, 9(2): 146-157.
- [26] 张本仁.大陆造山带地球化学研究I:岩石构造环境地球化学判别的改进[J].西北地质,2001,34(3):1-17.
ZHANG Ben-ren. Geochemical Study of Continental Orogenic Belts I: Improvement of Geochemical Discrimination of Tectonic Settings of Rocks[J]. Northwestern Geology, 2001, 34(3): 1-17.
- [27] WOOD D A, JORON J L, TREUIL M. A Re-appraisal of the Use of Trace Elements to Classify and Discriminate Between Magma Series Erupted in Different Tectonic Setting[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1979, 45(2): 326-336.
- [28] PEARCE J A, CANN J R. Tectonic Setting of Basic Volcanic Rocks Determined Using Trace Element Analyses[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1973, 19(2): 290-300.
- [29] CABANIS B, THIEBLEMONT D. Discrimination of Continental Tholeiites and Back-arc Basin Basalts Using a Th-Tb-Ta Diagram[J]. Chemical Geology, 1988, 70(1/2): 5.
- [30] JOCHUM K P, ANRDT N T, HOFMANN A W. Nb-Ta-La in Komatiites and Basalts: Constraint on Komatiite Petrogenesis and Mantle Evolution [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1991, 107(2): 272-289.
- [31] PEARCE J A. Trace Element Characteristics of Lava from Destructive Plate Boundaries[M]// THORPE R S, ANDESITES Q T. Orogenic Andesites and Related Rocks. Chichester: John Wiley and Sons, 1982: 525-548.
- [32] LOUBET M, SASSI R, DONATO D G. Mantle Heterogeneities: A Combined Isotope and Trace Element Approach and Evidence for Recycled Continental Crust Material in Some OIB Sources[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1988, 89: 299-315.
- [33] CONDIE K C. Plate Tectonics and Crustal Evolution [M]. 3rd ed. New York: Pergamon Press, 1989.
- [34] 李昌年.火成岩微量元素岩石学[M].武汉:中国地质大学出版社,1992.
LI Chang-nian. Igneous Petrology of Trace Element [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1992.
- [35] MCCULLOCH M T, GAMBLE J A. Depleted Source for Volcanic Arc Basalts: Constraints from Basalts of Kamadec-Taupo Volcanic Zone Based on Trace Elements, Isotopes, Subduction Chemical Geodynamics [C]// NMSBMMR. Continental Magmatism into Volcanic Conference: Abstract of New Mexico State Bureau of Mines and Mineral Resources Bulletin, New Mexico: NMSBMMR, 1989: 131-180.
- [36] 武莉娜,王志畅,汪云亮.微量元素 La, Nb, Zr 在判别大地构造环境方面的应用[J].华东地质学院学报, 2003, 26(4): 343-348.
WU Li-na, WANG Zhi-chang, WANG Yun-liang. On the Application of La, Nb and Zr in Identifying the Tectonic Settings[J]. Journal of East China Geological Institute, 2003, 26(4): 343-348.
- [37] 汪云亮,张成江,修淑芝.玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别[J].岩石学报,2001,17(3):413-421.
WANG Yun-liang, ZHANG Cheng-jiang, XIU Shu-zhi. Th/Hf-Ta/Hf Identification of Tectonic Setting of Basalts[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(3): 413-421.
- [38] 孙书勤,汪云亮,张成江.玄武岩类岩石大地构造环境的 Th、Nb、Zr 判别[J].地质论评,2003,49(1):40-47.
SUN Shu-qin, WANG Yun-liang, ZHANG Cheng-jiang. Discrimination of the Tectonic Settings of Basalts by Th, Nb and Zr[J]. Geological Review, 2003, 49(1): 40-47.
- [39] 孙书勤,张成江,黄润秋.板块汇聚边缘玄武岩大地构造环境的 Th、Nb、Zr 判别[J].地球科学进展,2006,21(6):593-598.
SUN Shu-qin, ZHANG Cheng-jiang, HUANG Run-qiu. The Tectonic Settings Discrimination of the Basalts in the Convergent Margin of Plate by Th, Nb and Zr[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(6): 593-598.