

玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf—Ta/Hf 图解判别

汪云亮 张成江 修淑芝

WANG YunLiang, ZHANG ChengJiang and XIU ShuZhi

成都理工学院三系, 成都 610059

3th Department of Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2000-07-14 收稿, 2001-03-28 改回.

Wang YL, Zhang CJ and Xiu SZ. 2001. Th/Hf—Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3):413—421

Abstract Th, Ta and Hf are refractory strong magmatophile elements. Because that the geochemical behavior of Th, Ta and Hf is similar during magmatic action, the ratios of Th, Ta and Hf could restore processes of mantle partial, magmatic fractional crystallization, mantle fractionation and so on. The Th/Hf and Ta/Hf ratios of basalts, especially primary one, reflect the differentiation of Th, Ta and Hf of its source region. In general, there is a close relationship between these characteristics and tectonic setting. Based on the ratios among Th, Ta and Hf of basalts formed from typical tectonic setting of the world, we propose a new tectonic identification scheme of basalts on the Th/Hf and Ta/Hf double logarithmic plot.

Key words Basalt, Tectonic setting, Th/Hf-Ta/Hf identification diagram.

摘要 Th, Ta, Hf 是一组耐熔强亲岩浆元素, 由于地球化学性质的相似性, 其相互之间的比值关系能将深部作用的地球化学过程较好地恢复出来。玄武岩类, 特别是原始玄武岩类形成的岩石的 Ta/Hf 及 Th/Hf 比值, 能较好地反映其源区的 Th、Ta、Hf 之间的分异特征, 在一般情况下, 这一特征与某种确定的大地构造环境有密切关系和确定的因果联系, 可用来判别玄武岩类形成的大地构造环境及其源区 Th、Ta、Hf 分异特征。本文根据典型大地构造环境玄武岩类的 Th、Ta、Hf 数据, 提出了玄武岩类形成的大地构造环境判别的 Th/Hf—Ta/Hf 双对数图及判别方法。

关键词 玄武岩; 大地构造环境; Th/Hf—Ta/Hf 判别图

中图分类号 P588.145; P595; P581

1 前言

根据岩浆岩的微量元素地球化学特征判别岩浆形成的大地构造环境和岩浆源区的化学性质, 在 80 年代发展很快, 提出了一些判别理论和许多方法。这些方法集中在对地壳中分布最广泛的玄武质岩浆岩和花岗质岩浆岩的判别。适合玄武质岩浆岩判别的主要有 Ti/100—Y·3—Zr 三角图 (Pearce *et al.*, 1973)、Th—Hf/3—Ta 三角图 (Wood *et al.*, 1979)、Th/Yb—Ta/Yb 关系 (Pearce, 1982)、Th/La—Ta/La 关系图 (Loubet *et al.*, 1988) 等。这些方法判别标志大

多是根据对大洋环境的研究建立的, 能够较好地判别大洋环境下玄武岩类形成的大地构造环境, 但不能很好地解决大陆及洋陆结合带这种复杂构造环境的判别。

当前, 随着人们将注意力由大洋转向大陆, 大陆动力学已成为当今地球科学的重大前沿课程。为适应这一重大转变, 人们正在努力探索解决大陆深部地质问题的途径和方法, 在研究内容上既重视大地构造环境的判别, 又重视深部作用过程中岩石地球化学演化特征。

本文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, 提出玄武岩类形成的大地构造环境的另一种判别图——Th/Hf—Ta/Hf 双对数图。

• 本文为四川省地学核技术重点实验室开放基金项目(HD-01)研究成果之一。
第一作者简介: 汪云亮, 男, 1937年生, 教授(博士生导师), 地球化学专业。

2 Th、Ta、Hf 的地球化学性质

Ta 和 Hf 是耐熔的高场强元素, Th 是耐熔大离子亲石元素。在深部作用过程中(如地幔分离、地幔部分熔融、岩浆分离结晶、地壳混染等), 在岩浆相、流体相或地幔分离后的活动分离相, 其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境显然是困难的, 但由于 Th、Ta、Hf 都是强不相容元素, 其亲岩浆性的变化是同步的, Ta/Hf 和 Th/Hf 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, 相对原始岩浆中, Ta/Hf 和 Th/Hf 比值大的差异被解释为源区成分不同引起 (McCulloch and Gamble, 1989)。根据岩浆岩源区成分判别原理 (汪云亮等, 1993), 原生岩浆岩的 Ta/Hf 和 Th/Hf 比值, 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。因此, 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。

3 数据的收集与选择

Th、Ta、Hf 比值有没有大地构造环境判别价值, 首先是通过研究世界上一些典型的大地构造环境区形成的岩浆岩系, 建立一套彼此能区别的标准。为了提高判别标志的可靠性, 我们统计了世界上典型地区年代较新、研究程度高、所属大地构造环境肯定、演化不明显, 基本上未受混染的玄武岩类的一万余组 Th、Ta、Hf 数据。

在数据选择上, 尽可能选取能代表原始岩浆成分的原生岩浆岩。这里所指的原生岩浆岩, 按池际尚(1988)的定义: 地幔部分熔融形成的原始岩浆, 未经明显的分离结晶作用, 且在岩浆上升过程中没有受到地壳的明显混染。当这种原始岩浆喷发到地表或在深部冷凝固结后, 形成原生岩浆岩。原始玄武岩形成的岩石判别主要依据 MgO、Cr、Ni 的含量。一般认为富 Mg 的 MORB 火山玻璃及 MgO>8% 的玄武岩可代表原始玄武岩形成的岩石 (Presnall and Hoover, 1987; Mckenzie and Bickle, 1988)。Cr、Ni 是高度相容元素, 在岩浆早期橄榄石分离结晶过程中其含量迅速下降, 因此, 其含量可以比 MgO 更好地估计岩石成分接近原始岩浆成分的程度。一般将 Cr、Ni 含量>200 μ g/g 的玄武岩看成接近原始岩浆成分的岩石 (汪云亮等, 1993)。除主要根据 MgO、Cr、Ni 含量判别玄武岩的原生性外, 同时也考虑其它组分。一般情况下成分上接近原始岩浆的玄武岩, SiO₂ 含量低, 微量元素中不相容元素如大离子亲石元素 K、Rb、Cs、Ba、Th 和高场强元素 Ta、Nd、Hf、Zr 以及 LREE 含量低。

另外, 由于 Th、Ta、Hf 都是强不相容元素, 在分离结晶过程中含量都在同步增加。因此, Th/Hf、Th/Ta、Ta/Hf 比值变化不明显。这一特征为本文研究对玄武岩成分是否接近原

始岩浆成分的要求大为放宽。即 Th、Ta、Hf 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。

综上所述, 本文数据收集与选择的标准是满足: ①玄武岩、玄武安山岩; ②MgO \geq 8%; ③Cr \geq 200 μ g/g; ④SiO₂ \leq 56%。

4 已知不同构造环境中玄武岩的 Th/Hf 和 Ta/Hf 比值

4.1 板块发散边缘

在板块发散边缘(洋板扩张脊), 主要岩石类型为大洋中脊玄武岩(MORB)。MORB 由洋脊下亏损地幔部分熔融产生的岩浆形成, 产率每年约 20km³, 是地球内部最大的岩浆源 (Mckenzie and O' Nions, 1991)。

N-MORB: 以①北大西洋中脊玄武岩 (Dosso *et al.*, 1993) (与图 1 中的 1 对应, 下同); ②东太平洋科科斯 (Cocos) 洋脊玄武岩 (Lonsdale *et al.*, 1992); ③意大利北部利古里亚 (Ligurian) Tethys 玄武岩 (Vannucci *et al.*, 1993) 为例, N-MORB 的 Ta/Hf<0.1, 平均为 0.067~0.083 (Viereck *et al.*, 1989), Th/Hf<0.2, 平均为 0.02~0.07 (Dosso *et al.*, 1993), 均低于原始地幔的值 (图 1 中的 M, Ta/Hf=0.148, Th/Hf=0.237, Taylor *et al.*, 1985)。N-MORB 中 Th、Ta 相对于 Hf 亏损的特征, 与 REE 中 LREE 相对于 HREE 亏损的特征类似 (Venturelli *et al.*, 1981, Becaluva *et al.*, 1984)。Th/Ta、Ta/Hf 比值低是 N-MORB 与其它大地构造环境形成的玄武岩区别的标志。

T-MORB 和 E-MORB (P-MORB): MORB 中与普遍分布的 N-MORB 相比, 地球化学上相对富集类型被称为过渡型 (T-MORB) 和富集型 (E-MORB) 或地幔柱型 (P-MORB)。从空间分布上, E-MORB 有两种情况, 一是分布于洋脊轴不同地段, 如 Galapagos 扩散中心、南探险者洋脊、大西洋中脊、印度洋脊等 (Vadim *et al.*, 2000)。二是产于洋脊轴以外的海山, 随机地分布于与扩张中心邻近的大洋板块内, 如东太平洋洋隆 15°~5°N 段和 13°~23°S 段 (Bach *et al.*, 1994; Niu and Batiza, 1997; Allan *et al.*, 1994)。其成因前者被认为与洋脊轴邻近的地幔柱有关, 为地幔柱—洋脊相互作用的结果 (Weaver, 1991; Mahoney *et al.*, 1994; Taylor *et al.*, 1997; Vadim *et al.*, 2000); 后者不能用地幔柱—洋脊相互作用模式来解释, 因为在其附近未发现地幔柱存在, 一般认为是由于洋壳岩石的回炉而形成相对富集的地幔呈星点随机分布在高度亏损的 N-MORB 的地幔源区, E-MORB 源于这种相对富集的地幔 (Niu *et al.*, 1999)。在成分上, T-MORB 和 E-MORB 的 Th/Ta、Nb/U 比值与 N-MORB 及 OIB 相似, 而 Ta/Hf、Nb/Zr 比值大于 N-MORB, 与 OIB 相似 (Hofman, 1988, 1997)。如图 1 中的④东太平洋科科斯洋脊 T-MORB (Lonsdale *et al.*, 1992); ⑤加拿大魁北克太古代

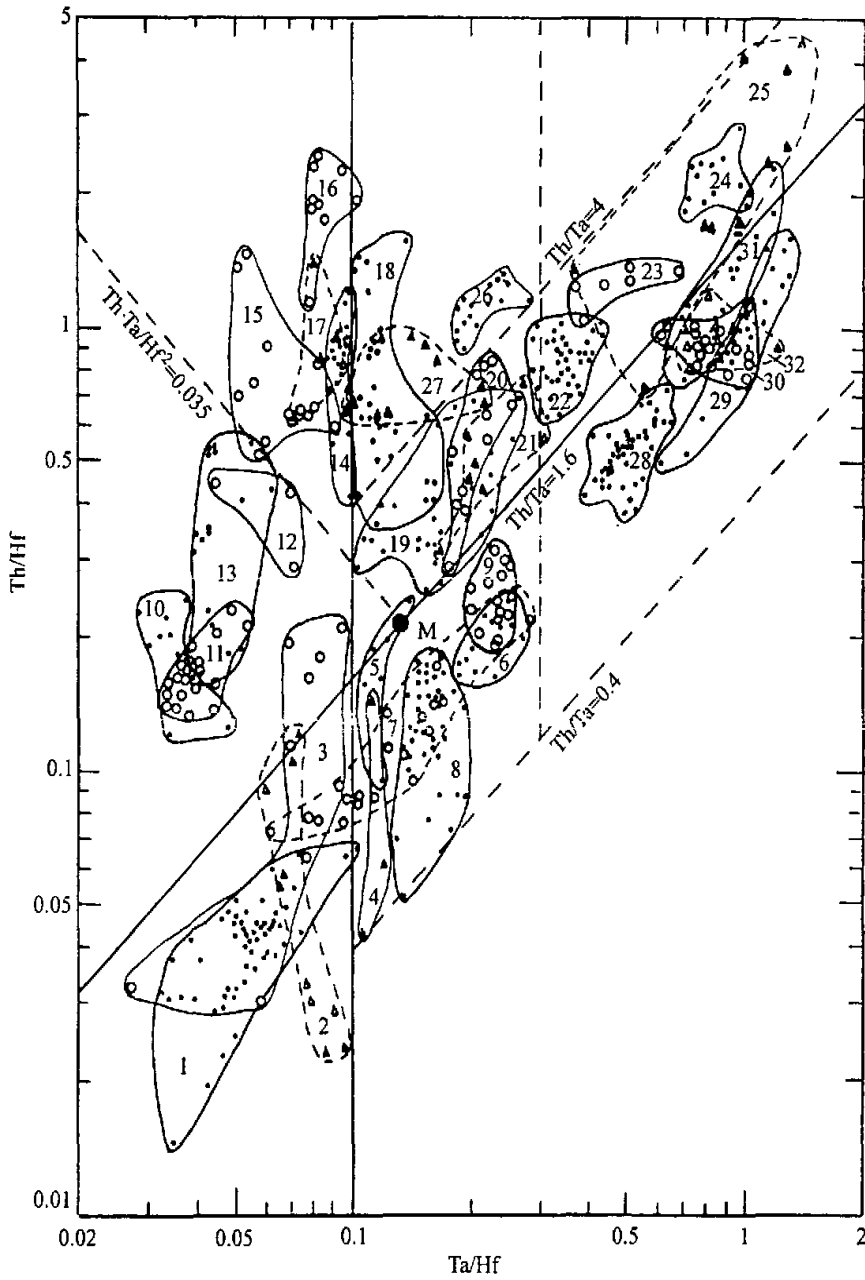


图1 典型大地构造环境玄武岩类的 Th/Hf-Ta/Hf 关系
 Fig.1 Relationship between Th/Hf and Ta/Hf of basalts on typical tectonic settings

T-MORB (Sawyer *et al.*, 1991)、⑥北大西洋中脊 E-MORB (Dosso L *et al.*, 1993)、⑦东太平洋隆起 11°~20°N 段 E-MORB (Niu *et al.*, 1999)。在 Th/Hf-Ta/Hf 关系图上, T-MORB 和 E-MORB (P-MORB) 与 OIB 难以区分, 其大地构造环境应根据与其伴生的 N-MORB 来判断。

4.2 大洋板内

大洋板内玄武岩分布于洋岛和火山链, 其岩石类型既有拉斑玄武岩, 也有碱性玄武岩。洋岛和火山链碱性玄武岩的 Th、Ta、Hf 具地幔柱特征, 与其它构造环境 (如大陆板内) 地幔柱形成的碱性玄武岩类似, 因此, 不具大地构造环境判别

价值,其大地构造环境判别需由碱性玄武岩伴生的拉斑玄武岩的 Th、Ta、Hf 特征判别。

大洋板内拉斑玄武岩可以⑧夏威夷 Koodau 玄武岩 (Frey *et al.*, 1994)、⑨冰岛玄武岩 (Furman *et al.*, 1992) 为代表,其特点是 $Th/Ta=0.4\sim 1.6$, $Ta/Hf=0.1\sim 0.3$ 。另外,夏威夷科哈拉 (Kohala) 岛玄武岩 (Budahn *et al.*, 1985)、夏威夷卡霍奥拉韦 (Kahoolawe) 玄武岩 (Lemman *et al.*, 1994)、东太平洋海隆西侧皮特凯恩 (Pitcairn) 海山玄武岩 (Woodhead *et al.*, 1993) 和美国黄石公园玄武岩 (Hildreth *et al.*, 1991) 的数据也落入这一范围内。

4.3 板块汇聚边缘

在板块汇聚边缘(陆缘火山弧、陆缘岛弧、陆缘裂谷、大洋岛弧、弧后盆地)玄武岩的岩石类型主要为钙碱性玄武岩 (Whitford *et al.*, 1979)。另一常见类型为拉斑玄武岩 (Mckenzie *et al.*, 1989) 和安山岩 (Pearce *et al.*, 1990)。这些类型岩石形成于与俯冲带有关的岩浆。岩石中高场强元素 Ta(Nb) 和 Hf(Zr) 含量普遍低,为 N-MORB 的 0.1~1 倍,这一特征被认为是亏损地幔部分熔融的结果 (Ellan *et al.*, 1988)。在高场强元素之间, Ta(Nb) 相对于 Hf(Zr) 亏损, Ta/Hf 比值低于到约等于 N-MORB 平均值 (0.067~0.083) (Viereck *et al.*, 1989)。很多学者认为这一特征与岩浆源区角闪石的参与有关 (Mckenzie 和 O'Nions, 1991; Oxburgh, 1964; Green, 1973; Egger, 1978)。Mckenzie 和 O'Nions (1991) 认为,岛弧玄武岩 Nb、Ta 亏损是因为 Nb、Ta 在角闪石中相容,岛弧岩浆源区 75% 为角闪石橄榄岩成分。

与 N-MORB 比较,岛弧玄武岩 Th 和其它不相容元素 (U、K、Rb、Cs、Ba) 富集, Th/Hf 比值高。这与上述岛弧玄武岩 Ta/Hf 比值低呈明显对照。以 Th 为代表的 LILE 相对于以 Ta(Nb) 为代表的 HFSE 富集,构成了与俯冲带有关的板块汇聚边缘大地构造环境另一判别指标 (Mckenzie 和 O'Nions, 1991)。Th/Ta 比值高通常被解释为由于岩石静压力增高,下俯板块对上覆地幔楔中 Th、U 及 K、Rb、Cs、Ba 等元素的交代富集引起 (Hawkesworth *et al.*, 1977; Saunders 和 Tarney, 1979; Pearce, 1983)。但是,相对于洋壳 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素没有明显富集,因此他们认为富集不是来自下俯板块片的顶部。

总结上述, Ta/Hf 比值低是板块发散边缘(洋板块扩张脊)和板块汇聚边缘玄武岩类的共同特征,后者较前者可以更低,这一特征与其它大地构造环境形成的玄武岩类明显不同。Th/Ta 比值高是板块汇聚边缘玄武岩类与板块发散边缘玄武岩类的区别特征。如图 1 中:⑩南太平洋斐济以南汤加 Valu Fa 洋脊岛弧玄武岩 (Vallier *et al.*, 1991)、⑪塞浦路斯特罗多斯玄武质安山岩 (Bednarz *et al.*, 1994)、⑫墨西哥西部玄武质安山岩 (Lange *et al.*, 1990)、⑬马尼安纳岛弧玄武岩-玄武安山岩 (Elliot, 1997)、⑭北美西部俄勒冈洲火山口湖流纹英安质熔岩 (Nakada *et al.*, 1994)、⑮南安第斯山脉

安山岩系 (Gerlach *et al.*, 1983)、⑯菲律宾塔阿尔 (Taal) 火山玄武岩-玄武安山岩系 (Miklius *et al.*, 1991)、⑰日本琉球岛弧玄武岩 (Shinjo *et al.*, 1999)。其总特征是: $Th/Ta > 1.6$, $Ta/Hf < 0.1$ 。另外,俄罗斯堪察加基性火山岩 (Bindeman *et al.*, 1994)、智利安第斯山塔塔拉圣佩罗 (Tatara San Pedro) 安第斯弧第四纪玄武质安山岩 (Ferguson *et al.*, 1992)、加拿大元古代岛弧碱性玄武岩 (Corriveau *et al.*, 1993)、小安提尼斯群岛北部圣·马丁岛玄武岩-安山岩系 (Davidson *et al.*, 1993)、菲律宾玄武岩-碧玄岩 (Ban *et al.*, 1993)、南极洲北段南 Shetland 群岛火山弧玄武岩 (Willand *et al.*, 1999) 等都具有上述特征。

由图 1 可见,大洋岛弧玄武岩与陆缘火山弧、陆缘岛弧玄武岩的 Th、Ta、Hf 成分既有共同点 ($Th/Ta > 1.6$, $Ta/Hf < 0.1$), 也有不同之处。前者的 Th/Hf、Ta/Hf 比值较低,成分区靠近 N-MORB 一侧,而后者 Th/Hf、Ta/Hf 比值相对较高,成分区靠近大陆玄武岩一侧,大致可以原始地幔 (Taylor *et al.*, 1985) 的 $Th \cdot Ta/Hf^2 = 0.035$ 为界,将二者分开 ($Th \cdot Ta/Hf^2$ 为图 1 中斜率为 -1 的直线)。

与俯冲带有关的陆缘裂谷、陆缘弧后盆地拉张环境形成的玄武岩类岩石,其 Th/Ta 比值与岛弧玄武岩相似,但 Ta/Hf 比值较高 (> 0.1),在 Th/Hf-Ta/Hf 关系图上落入大陆板内区。如⑱日本中冲绳弧后盆地 < 1Ma 的玄武岩,被认为是在菲律宾板块俯冲于欧亚板块,发生碰撞后拉张环境下形成的,其 $Th/Ta = 2.52 \sim 5.0$, 平均 3.68, $Ta/Hf = 0.104 \sim 0.164$, 平均 0.137 (Shinjo *et al.*, 1999)。

4.4 大陆板内

大陆板内玄武岩主要有大陆裂谷和陆内热柱两种成因类型。

大陆裂谷玄武岩主要类型为高 Ti 和低 Ti 拉斑玄武岩、高 K 钙碱性玄武岩等。高场强元素含量低,但 Ta(Nb) 相对于 Hf(Zr) 富集, Ta/Hf 比值比 N-MORB 和岛弧构造环境形成的玄武岩类高;以 Th 为代表的大离子亲石元素含量高,加上较高的 $^{87}Sr/^{86}Sr (> 0.706)$ 和低的 $^{143}Nd/^{144}Nd (< 0.5125)$, 被认为是典型大陆板内环境的标志 (Davis 和 Hawkesworth, 1993)。大陆裂谷玄武岩 HFSE 含量低很难用地壳混染作用解释 (Ormerod *et al.*, 1991; Arndt 和 Christensen, 1992)。因为地壳混染物的量需要达到 50%~90%, 这样大的量是不实际的。Ormerod *et al.* (1991) 指出,大陆板内玄武岩,如美国西部大盆地中钙碱性玄武岩 Nb、Ta 负异常说明岩石是由大陆岩石圈地幔较小程度 (2%~4%) 部分熔融形成 (Davis *et al.*, 1993)。

图 1 中典型大陆裂谷玄武岩系:⑲克温拉湾 (Keweenaw) 古裂谷玄武岩 (加拿大一侧) (Shirey *et al.*, 1994)、⑳俄罗斯诺里尔斯克 (Noril'sk) 拉斑玄武岩 (Wooden *et al.*, 1993)、㉑中国东部新生代拉斑玄武岩 (吴利仁等, 1985)、㉒峨眉山玄武岩 (汪云亮等, 1993)、㉓中国东部新生

代碱性玄武岩(Wu Liren *et al.*, 1985)、②东非大裂谷西支卢旺达碧玄岩-粗面岩系(Rogers *et al.*, 1992)、③东非大裂谷西支Kivu中新世至现代玄武岩(Furman *et al.*, 1999)。其特征是 $Th/Ta=1.6\sim 4$, $Ta/Hf>0.1$ 。南非Klipriviersberg组晚太古代大陆溢流拉斑玄武岩系(Marsh *et al.*, 1992)和新西兰北岛玄武岩-安山岩-碧玄岩系(Briggs *et al.*, 1990)等也落入该范围内。

由图1可见,大陆裂谷拉斑玄武岩较碱性玄武岩Ta/Hf比值低,前者一般为 $0.1\sim 0.3$,后者一般大于 0.3 。峨眉山玄武岩系介于二者之间,汪云亮等(1993)认为是介于拉斑玄武岩与碱性玄武岩之间的热界面玄武岩。

一般来说,在大陆拉张带(或裂谷初期)环境形成的玄武岩,由于其岩浆源区相对较浅,岩石的Th/Ta比值较典型的裂谷环境玄武岩的Th/Ta比值大,前者一般大于4,后者一般在 $1.6\sim 4$ 之间。如④巴西帕那拉玄武岩(Hughe *et al.*, 1986)、⑤美国西部新墨西哥州第三纪中期玄武岩类(Davis *et al.*, 1993)。随拉张程度的逐渐增大,岩石的Th/Ta、Th/Hf比值不断下降,直至具典型裂谷环境玄武岩的特征,据此可以推断裂谷形成的过程(Shinjo *et al.*, 1999)。另外,陆-陆碰撞、陆内俯冲环境形成的玄武岩也落入大陆板内区,且Th/Ta比值较大。如意大利Aeolian群岛0.12百万年至现代的高钾钙碱性玄武岩的 $Ta/Hf=0.12\sim 0.4$, $Th/Ta=11.1\sim 27.2$ (Astis *et al.*, 1997)。

大陆板内玄武岩由于形成于大陆拉张到裂谷两侧间大洋板块的出现,其Ta/Hf、Th/Ta比值常留有与邻近大地构造环境的影响。如在被动大陆边缘原古裂谷形成的玄武岩常有少数岩石具有N-MORB特征,而在邻近俯冲带的陆内拉张环境形成的玄武岩,常有少数岩石具岛弧玄武岩特征。

典型的陆内热柱成因玄武岩与大洋板内热柱、洋脊热柱成因玄武岩的Th、Ta、Hf特征没有明显差异(详见后述)。但当其受地壳混染明显时,Th含量升高,Th/Hf、Th/Ta比值增大,与陆内裂谷碱性玄武岩相似。

4.5 地幔热柱成因玄武岩

地幔热柱(热点)并不代表特定的板块构造类型。地幔热柱形成的岩石属碱性玄武岩系,其岩浆源区位于软流层,或者来自岩石圈上地幔,但受到软流层物质的明显影响。由于软流层处于板块的下方,地幔柱可以穿过不同性质的板块及板块的不同部位。因此来自这一源区的玄武岩系除大洋板内以热点形式出现外(如法属波利尼西亚群岛),在板块发散边缘(如特里斯坦-达库尼亚岛、北冰洋Mayeu洋脊Mayeu岛)、大陆裂谷(如南极大陆边缘、肯尼亚东非裂谷)、岛弧(如台湾西北及澎湖)以及三个板块交点——三联点附近(如海南岛北部,处于欧亚大陆板块、印度大陆板块、菲律宾板块交点附近)都有产出。

图1标出了不同大地构造环境区典型地幔热柱成因玄武岩系的成分区:⑥法属波利尼西亚方阿陶法(Fangataufa)

环礁玄武岩(Schiano *et al.*, 1993)、⑦肯尼亚北部玄武岩(Class *et al.*, 1994)、⑧南极罗斯岛Erebus地幔柱玄武岩(Kyle *et al.*, 1992)、⑨德国西部大陆板内新生代地幔柱玄武岩(Wedepohl *et al.*, 1994)、⑩北冰洋Mayeu洋脊Mayeu岛地幔柱玄武岩(Tronnes *et al.*, 1999)。其总特征是 $Ta/Hf>0.3$, $Th/Ta<1.6$ 。据研究,具地幔热柱成因的夏威夷哈莱阿卡拉火山玄武岩(West *et al.*, 1994)、瓦湖岛玄武岩(Clague *et al.*, 1982)、考爱卡拉岛碱性火山岩系(Maaloe *et al.*, 1992)、南太平洋波利尼西亚群岛玄武岩(Dupuy *et al.*, 1993)、阿拉伯联合酋长国喷出的碱流岩(Woolley, 1991)、中国海南岛北部碱性玄武岩-橄榄拉斑玄武岩(Flower *et al.*, 1992)、北大西洋金丝雀群岛玄武岩(Hoernle *et al.*, 1993)和台湾西北部玄武岩(Chung *et al.*, 1995)以及俄罗斯科拉半岛地幔柱成因的金伯利岩、橄榄辉斑岩、苦橄岩(Mahotkin *et al.*, 2000)等均具有上述特征。

地幔热柱成因玄武岩系无论出于何种构造环境,岩石的Th、Ta、Hf特征基本一致,暗示软流层岩浆源区化学性质相同或相近。地幔热柱成因玄武岩与其它成因玄武岩的最显著的差别是高度富集Ta、Ta/Hf比值一般大于 0.3 ,这恰好与N-MORB和岛弧环境玄武岩的岩浆源区Ta高度亏损呈明显对照。据研究,与地幔热柱有关的玄武岩的Th/Ta比值变化较大,这除与岩浆源区Th含量有关外,还与软流层物质影响程度有关。当来自软流层物质较多时,Th/Ta比值一般较低。而当主要来自岩石圈上地幔或受地壳混染明显时,Th/Ta比值有时较高,在Th/Hf-Ta/Hf关系图上,其成分区落入大陆板内碱性玄武岩区。据侯增谦等(1999)、Lu Jiren(1996)、汪云亮等(1999)、Sun-Lin Chung *et al.*(1995)和张成江等(1999)研究,中国西南峨眉山玄武岩系也具有地幔热柱成因的特点。其Ta/Hf比值在 $0.3\sim 0.66$ 之间,平均 0.36 。与大陆边缘裂谷区碱性玄武岩相似,暗示岩浆源区较富Th,在地幔羽流影响下形成的岩浆沿大陆边缘裂谷上升形成峨眉山玄武岩系(张成江等, 1999)。

5 结论

由图1可见,不同构造环境区玄武岩系的Th、Ta、Hf特征具有显著的差异。大致可以原始地幔(Taylor *et al.*, 1985)的Th/Ta比值为 1.6 为界(Th/Ta比值为图1中 45° 直线所标志的值),将大陆和大洋环境分开,大陆板内及岛弧玄武岩的Th/Ta比值高于原始地幔值,MORB及OIB的Th/Ta比值低于原始地幔值。这一特征是大陆岩石圈地幔与大洋地幔成分差异的反映,被认为是地球早期历史中大陆地壳分离的结果(Hofman, 1986; 1997)。由N-MORB、T-MORB、E-MORB、OIB向地幔热柱成因玄武岩,Th/Ta比值相似,但Ta/Hf比值递增。其中,N-MORB的 $Ta/Hf<0.1$,地幔热柱成因玄武岩的 $Ta/Hf>0.3$,T-MORB、E-MORB和OIB介于二者之间。岛弧和大陆板内裂谷区玄武

岩的 Th/Ta 比值均大于 1.6, 但前者的 Ta/Hf < 0.1, 而后的 Ta/Hf > 0.1。大致可以 Ta/Hf = 0.3 为界, 将陆内拉斑玄武岩与碱性玄武岩分开。据此, 我们提出了玄武岩类形成的大地构造环境及其源区的 Th/Hf-Ta/Hf 图解(图 2)。

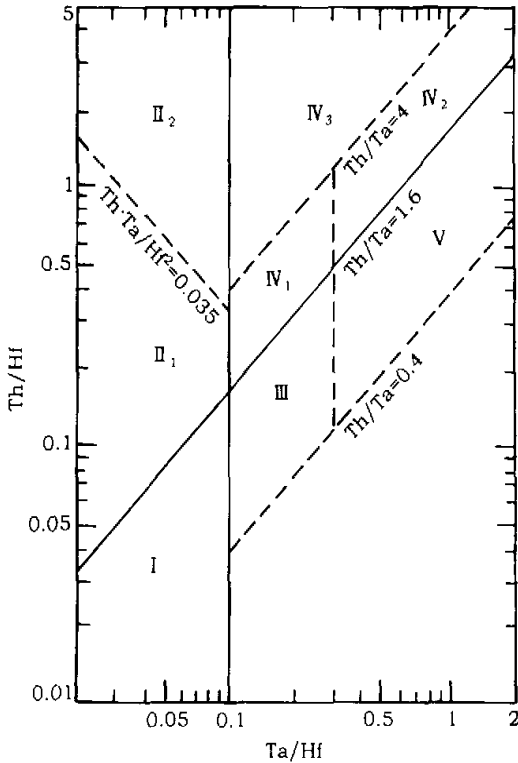


图 2 玄武岩类大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 判别图

I. 板块发散边缘 N-MORB 区; II. 板块汇聚边缘(II₁. 大洋岛弧玄武岩区; II₂. 陆缘岛弧及陆缘火山玄武岩区); III. 大洋板内洋岛、海山玄武岩区及 T-MORB, E-MORB 区; IV. 大陆板内(IV₁. 陆内裂谷及陆缘裂谷拉斑玄武岩区; IV₂. 陆内裂谷碱性玄武岩区; IV₃. 大陆拉张带(或初始裂谷)玄武岩区); V. 地幔热柱玄武岩区

Fig. 2 Th/Hf-Ta/Hf identification diagram of tectonic setting of basalts

判别标志是:

(1) 板块发散边缘: N-MORB 的 Th/Ta < 1.6, Ta/Hf < 0.1。

(2) 板块汇聚边缘: 岛弧玄武岩的 Th/Ta > 1.6, Ta/Hf < 0.1。其中大洋岛弧玄武岩的 $Th \cdot Ta/Hf^2 < 0.035$, 陆缘岛弧、陆缘火山玄武岩的 $Th \cdot Ta/Hf^2 > 0.035$ 。

(3) 大洋板内: 洋岛、海山玄武岩的 Th/Ta < 1.6, Ta/Hf > 0.1。其中拉斑玄武岩的 Ta/Hf = 0.1~0.3, 碱性玄武岩的 Ta/Hf > 0.3。

(4) 大陆板内: 大陆板内玄武岩的 Th/Ta > 1.6, Ta/Hf

> 0.1。其中拉斑玄武岩的 Ta/Hf = 0.1~0.3, 碱性玄武岩的 Ta/Hf > 0.3。典型裂谷玄武岩的 Th/Ta = 1.6~4, 陆内拉张带或初始裂谷玄武岩的 Th/Ta > 4(一般 4~10)。

(5) 地幔热柱成因玄武岩: Ta/Hf > 0.3, Th/Ta 比值变化较大。

(6) 其它: T-MORB 和 E-MORB 的 Th, Ta, Hf 特征与 OIB 相似。陆缘裂谷、陆缘弧后盆地玄武岩的 Th, Ta, Hf 特征与大陆板内玄武岩相似。陆-陆碰撞形成的造山带玄武岩 Ta/Hf 比值和大陆板内相似, 但 Th/Ta 比值一般大于 10, 高于大陆板内拉张带或初始裂谷玄武岩的值。

Th/Hf~Ta/Hf 图较好地地区分出了大洋板内与大陆板内玄武岩以及地幔热柱成因玄武岩, 并能更有效地地区分大陆板内与俯冲带环境玄武岩。值得注意的是, 使用该图时所用岩石样品要符合本文样品选择的条件。

References

- Arndt NT and Christensen V. 1992. The role of lithospheric mantle in continental flood volcanism. *J. Geophys. Res.*, 97:10967-10981
- Astis GD and Volpe LL. 1997. Volcanological and petrological evolution of volcano island (Aeolian Arc, Southern Tyrrhenian Sea). *J. Geophys. Res.*, 102(B4):8021-8050
- Bach W, Hegner E, Erzinger E *et al.* 1984. Chemical and isotopic variations along the superfast spreading East Pacific Rise from 6° to 30°S. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 116:365-380
- Bednars U and Schmincke HU. 1994. Petrological and chemical evolution of the northeastern Troodos extensive series, Cyprus. *Journal of Petrology*, 35(2):489-523
- Bindeman IN and Bailey JC. 1994. A mode of reverse differentiation at Dikii Greben Volcano, Kamchatka, progressive basic magma vesiculation in a silicic magma chamber. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 117(3):263-278
- Budahn JR and Schmitt RA. 1985. Petrogenetic modeling of Hawaiian tholeiitic basalts: A geochemical approach. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49(1):67-87
- Chi Jishang *et al.* 1988. The Study of Cenozoic basalts and upper mantle in Eastern China, enclosed kimberlites. Wuhan: The Publishing House of China University of Geosciences. (in Chinese)
- Clague DA and Frey FA. 1982. Petrology and trace element geochemistry of the Honolulu volcanics, Oahu; implications for the oceanic mantle below Hawaii. *Journal of Petrology*, 23:447-504
- Class C *et al.* 1994. Geochemistry of Pliocene to Quaternary alkali basalts from the Huri Hills, northern Kenya. *Chemical Geology*, 113(1/2):1-22
- Davis J and Hawkesworth C. 1993. The petrogenesis of 30~20 Ma basic and intermediate volcanics from the Mogollon-Datil

- Volcanic Field, New Mexico, U. S. A. *Contrib. Miner. Petrol.*, 115:165-183
- Dosso L *et al.* 1993. Geochemical morphology of the North-Mid Atlantic Ridge, 10 ~ 40°N. Trace element isotope complementarity. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 120:443-462
- Dupuy C *et al.* 1993. Basalts from Mururoa, Fangataufa and Gambier islands (French Polynesia); Geochemical dependence on the age of the lithosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 117:89-100
- Eggler DH. 1978. The effect of CO₂ upon partial melting of peridotite in the system Na₂O-CaO-Al₂O₃-MgO-SiO₂-CO₂ to 35 kb, with an analysis of melting in a peridotite-H₂O-CO₂ system. *Am. J. Sci.*, 278:305-343
- Ellen RM and Hawkesworth CJ. 1988. Elemental and isotopic variations in subduction related basalts; evidence for three component model. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 98:72-80
- Elliott T, Plank T, Zindler A *et al.* 1997. Element transport from slab to volcanic front at the Mariana arc. *J. Geophys. Res.*, 102 (B7):14991-15019
- Frey FA *et al.* 1994. Geochemical characteristics of Koolau volcano; Implications of intershield geochemical differences among Hawaiian volcanoes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58:1441-1462
- Furman T *et al.* 1992. Petrogenesis of evolved basalts and rhyolites at Austurhorn, Southeastern Iceland: The role of fractional crystallization. *Journal of Petrology*, 33(6):1105-1445
- Gerlach DC *et al.* 1988. Recent volcanism in the Puelicordón Canlla region, South Andes Chile (40. 55) petrogenesis of evolved lava. *Journal of Petrology*, 29(2):351-359
- Green DH. 1973. Experimental melting studies on a model upper mantle composition at high pressure under water-saturated and water-unsaturated conditions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 19:37-53
- Hawkesworth CJ, O' Nions RK, Pankhurst RJ *et al.* 1977. A geochemical study of island-arc and back-arc tholeiites from Scotia Sea. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 36:253-262
- Hofmann AW. 1997. Mantle geochemistry: The message from oceanic volcanism. *Nature*, 385:219-229
- Hofmann AW. 1988. Chemical differentiation of the Earth: The relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 90:297-314
- Hou Zengqian, Lu Jiren, Wang Yunliang *et al.* 1999. Emei large igneous rocks province; characteristics and origin. *Geological Review*, 45(Sup):885-891 (in Chinese with English abstract)
- Hughes SS *et al.* 1986. Trace element and Sr-Nd isotopic on the compositions of lithospheric primary source of Serra Geral continental flood basalts, southern Brazil. *Geochemical Journal*, 20:173-189
- Kyle PL *et al.* 1992. Petrologic evolution of anorthoclase phonolite lavas at Mount Erebus Ross Island, Antarctica. *Journal of Petrology*, 33(4):849-875
- Lange RA and Carmichael ISE. 1990. Hydrous basaltic andesides associated with minette and related lava in western Mexico. *Journal of Petrology*, 31:1225-1259
- Liu YG and Schmitt RA. 1984. Chemical profiles in sediment and basalt samples from deep sea drilling project leg 74, Hole 525A, Walvis Ridge, Init. Repts. DSDP, vol. LXXIU, 74:731-730. Government Printing Office, Washington
- Lonsdale P *et al.* 1992. The RRR triple junction at the southern end of the Pacific-Cocos East Pacific Rise. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 109:73-85
- Loubet M *et al.* 1988. Mantle heterogeneities; a combined isotope and trace element approach and evidence for recycled continental crust material in some OIB source. *Earth Planet. Sci. Lett.* 89:299-315
- Lu Jiren. 1996. The dynamic characteristics of Emei mantle plume. *Acta Geoscientia Sinica*, 17 (4): 424-438 (in Chinese with English abstract)
- Maaloe S *et al.* 1992. The kooloa volcanic suite of Kauai, Hawaii. *Journal of Petrology*, 33(4):761-784
- Mahoney JJ, Sinton JM, Kurz DM *et al.* 1994. Isotopic and trace element characteristics of a super-fast spreading ridge: East Pacific Rise, 13~23°S. *Earth Planet Sci. Lett.*, 121:173-193
- Mahotkim IL, Gibson SA, Thompson RN *et al.* 2000. Late Devonian diamondiferous kimberlite and alkaline picrite (proto-kimberlite) magmatism in the Arkhangelsk region. *J. Petrol.*, 41(2):201-222
- McCulloch MT and Gamble JA. 1989. Depleted source for volcanic arc basalts; constraints from basalts of Kemaedec-Taupo volcanic zone based on trace elements, isotopes and subduction chemical geodynamics. In: *Continental Magmatism. Into Volcanic Conf.-Abstr.* New Mexico. *Bur. Miner. Resour. Bull.* 131, 180
- McKenzie D and Bickle MJ. 1988. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere, *J. Petrol.* 29:625-679
- McKenzie D and Onions RK. 1991. Partial melt distributions from inversion of rare earth element concentrations. *J. Petrology*. 32:1021-1091
- Miklius A *et al.* 1991. Geochemistry of lavas from Taal volcano, southwestern Luzon, Philippines; Evidence for multiple magma supply systems and mantle source heterogeneity. *Journal of Petrology*, 32(3):593-627
- Nakada S *et al.* 1994. Origin of phenocrysts and compositional diversity in pre-Mazama rhyodacite lavas, Crater Lake, Oregon. *Journal of Petrology*, 35(1):127-162
- Niu Y and Batiza R. 1997. Trace element evidence from seamounts for recycled oceanic crust in the eastern Pacific mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 148:471-483
- Niu Y and Collerson KD. 1999. Origin of enriched-type mid-ocean ridge basalt at ridges far from mantle plume; The East Pacific Rise at 11°20'N. *J. Geophys. Res.*, 104(B4):7067-8087

- Ormerod DS, Rogers NW and Hawkesworth CJ. 1991. Melting in the lithospheric mantle. Inverse modelling of alkali olivine basalt from the Big Pine volcanic field, California. *Contrib. Miner. Petrol.*, 108:305-317
- Oxburgh ER. 1964. Petrological evidence for the presence of amphibole in the upper mantle and its petrogenetic and geophysical implications. *Geol. Mag.*, 101:1-19
- Pearce JA. 1982. Trace element characteristics of Lava from destructive plate boundaries. In: Thorpe R S. (ed.) *Andesites, orogenic andesites and related rocks*. New York. John Wiley and Sons: 525-548
- Pearce JA and Cann JR. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analysis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 19:290-300
- Pearce LG, De Bari SM and Sleep NH. 1990. Mass balance calculations for two sections of island arc crust and implications for the formation of continents. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 96: 427-442
- Presnall DC and Hoover JD. 1987. High pressure phase equilibrium constraints on the origin of mid-ocean ridge basalts. In: Mysen B O (ed.). *Magmatic processes. Physicochemical Principles*. Spec. Publ. Geochem. Soc. I, 75-89
- Rogers NW *et al.* 1992. An enriched mantle source for potassic basanites: evidence from Karisimbi volcano, Virunga volcanic province, Rwanda. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 111(4):543-556
- Romick JD *et al.* 1992. The influence of amphibole fractionation on the evolution of calc-alkaline andesite and dacite tephra from the central Aleutians, Alaska. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 112(1): 101-118
- Shinjo R, Chung SL, Kato Y *et al.* 1999. Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of volcanic rocks from the Okinawa Trough and Ryukyu Arc: Implications for the evolution of a young, intracontinental back arc basin. *J. Geophys. Res.*, 104 (B5):10591-10608
- Saunders AD and Tarney J. 1979. The geochemistry of basalts from a back-arc spreading center in the East Scotia Sea. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 43:552-572
- Sawyer EW. 1991. Disequilibrium melting and the rate of melt residuum separation during migmatization of mafic rock from the Grenville Front, Quebec. *Journal of Petrology*, 32:701-738
- Schiano P *et al.* 1993. Application of element concentration variability to the study of basalt alteration (Fangataufa atoll, French Polynesia). *Chemical Geology*, 104(1/4):99-124
- Shrey SB *et al.* 1994. Temporal change in the sources of flood basalts: Isotopic and trace element evidence from the 1100Ma old Keweenaw Mamineuse Point Formation, Ontario, Canada. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58:4475-4490
- Sun-Lin Chung and Bor-Ming Jahn. 1995. Plume-lithosphere interaction in generation of the Emei flood basalts at Permian-Triassic boundary. *Geology*, 23(10):889-892
- Taylor RN, Thirwall MF, Morton BJ *et al.* 1997. Isotopic constraints on the influence of the Icelandic plume. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 148:E1-E8
- Taylor S. R. and McLennan S. 1985. *The continental crust: Composition and evolution*. Blackwell Scientific Publications. 54:209-372
- Tronnes RG *et al.* 1999. Recent volcanic rocks from Jan Mayen; Low-degree melt fractions of enriched northeast Atlantic mantle. *J. Geophys. Res.*, 104(B4):7153-7168
- Vadim SK, John LE, Anthony J *et al.* 2000. Enriched end-member of primitive MORB melts: Petrology and Geochemistry of glasses from Macquarie Island (SW Pacific). *J. Petrol.*, 41 (3):411-430
- Vallier TL *et al.* 1991. Subalkaline andesite from Valu Fa Ridge, a back-arc spreading center in southern Lau Basin; Petrogenesis, comparative chemistry and tectonic implications. *Chemical Geology*, 91(3):227-256
- Vannucci R *et al.* 1993. Ophiolitic magmatism in the Ligurian Tethys: an ion microprobe study of basaltic clinopyroxenes. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 115(2):123-137
- Viereck LG, Flower MFJ, Hertogen J *et al.* 1989. The genesis and significance of N-MORB Sub-types. *Contr. Miner. Petrol.*, 102:112-126
- Wang Yunliang, Li Juchu, Han Wenxi and Wang Wangzhang. 1993. The principles for discrimination of the source composition of mantle-derived igneous rocks and the nature of the mantle source region of the Emeishan basalts. *Acta Geologica Sinica*, 6(3):315-328
- Wang Yunliang, Hou Zengqian, Xiu Shuzhi *et al.* 1999. The discussion on thermal anomaly of mantle plume in Emei igneous province. *Geological Review*, 45(Sup):876-879 (in Chinese with English abstract)
- Wang Yunliang, Li Juchu, Zhou Rongshen *et al.* 1993. Principle on trace element geochemistry of igneous rocks and its application and demonstration of the petrogenesis of Emeishan basalts. Press of Chengdu University of Science and Technology (in Chinese)
- Weaver BL. 1991. The origin of ocean island basalt end-member compositions, Trace element and isotopic constraints. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 104:381-397
- Wedepohl KH, Gohn E and Hartmann G. 1994. Cenozoic alkali basaltic magmas of western Germany and their products of differentiation. *Contrib. Miner. Petrol.*, 115:253-278
- West HB and Leem WP. 1994. The open-system geochemical evolution of alkalic cap lavas from Haleakala Crater, Hawaii, U.S.A. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58:773-796
- Whitford DJ, Nicholls IA and Taylor SR. 1979. Spatial variations in the geochemistry of Quaternary lavas across the Sunda Arc in Java and Bali. *Contr. Miner. Petrol.*, 70:341-356
- Wood DA, Joron JL and Treuil MA. 1979. Reappraisal of the use of trace elements to classify and discriminate between magma series erupted in different tectonic setting. *Earth Planet. Sci.*

Lett., 45:326-336

Wooden J *et al.* 1993. Isotopic and trace element constraints on mantle and crustal contributions to Siberian continental flood basalts, Noril'sk area, Siberia. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57:3677-3704

Wu Liren, Zhai Mingzhe and Zheng Xiangsheng. 1985. Cenozoic volcanic rocks of Eastern China. *Acta Petrologica sinica*, (4):1-23 (in Chinese with English abstract)

Zhang Chengjiang, Wang Yunliang and Hou Zengqian, 1999. Th, Ta and Hf characteristics and the tectonic setting of magmatic source region of Emeishan basalts. *Geological Review*, 45 (Sup):858-860 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

池际尚等. 1988. 中国东部新生代玄武岩及上地幔研究(附金伯利岩). 武汉:中国地质大学出版社

侯增谦, 卢纪仁, 汪云亮等. 1999. 峨眉火成岩省: 结构、成因与特色. *地质论评*, 45(增刊):885-891

卢纪仁. 1996. 峨眉地幔热柱的动力学特征. *地球学报*, 17(4):424-438

汪云亮, 侯增谦, 修淑芝等. 1999. 峨眉火成岩省地幔热柱热异常初探. *地质论评*, 45(增刊):876-879

汪云亮, 李巨初, 周善生等. 1993. 岩浆岩微量元素地球化学原理及其应用——兼论峨眉山玄武岩的成因. 成都: 成都科技大学出版社

汪云亮, 李巨初, 韩文喜等. 1993. 幔源岩浆岩源区成分判别原理与峨眉山地幔源区性质. *地质学报*, 67(1):52-62

吴利仁, 翟明国, 郑祥身等. 1985. 中国东部新生代火山岩. *岩石学报*, 1(4):1-23

张成江, 汪云亮, 侯增谦. 1999. 峨眉山玄武岩系的 Th, Ta, Hf 特征及岩浆源区大地构造环境探讨. *地质论评*, 45(增刊):858-860