

俯冲带复杂的壳幔相互作用

赵振华, 王 强, 熊小林

中国科学院 广州地球化学研究所, 广州 510640

摘 要:俯冲带除俯冲板片脱水形成的富大离子亲石元素流体、交代地幔楔形成的岛弧钙碱性玄武岩-安山岩-英安岩-流纹岩及相应侵入岩组合外,还存在由俯冲板片熔融形成的埃达克质熔体交代地幔楔形成的埃达克岩-富铌玄武岩-富镁安山岩组合,从而构成了俯冲带的流体交代与熔体交代两大类壳幔相互作用体系及相应的岩石组合。熔体交代作用的显著特点是 Mg、高场强元素 Nb、Ti、P 等含量增加, Nd/Sr 值增高,而 Si、K、Na 及 La/Yb 降低。洋壳板片或洋脊俯冲、玄武质岩浆底侵使地壳增厚,或板片断裂、撕裂等作用均可产生埃达克质熔体并随之产生熔体交代作用。流体和熔体与地幔橄榄岩的相互作用构成了俯冲带复杂的地球化学体系。

关 键 词:俯冲带;熔体交代作用;埃达克岩;富铌玄武岩;富镁安山岩

中图分类号:P594 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2802(2004)04-0277-08

板块俯冲带是壳幔相互作用最复杂的地区之一,多种火成岩组合及规律性展布,硅、碱金属,特别是微量元素含量及组合的空间规律性分布-成分极性,以及丰富、强烈的成矿作用,使俯冲带成为地球动力学研究的重点地区之一。板块的俯冲、拼合过程使俯冲带成为一座“工厂”^[1,2]。其“原料”、“产品”及“副产品”构成了俯冲带复杂的地球化学体系:原料即洋壳、深海沉积物及地幔楔,产品为岛弧岩浆与新生陆壳,副产品为与俯冲过程相关的脱水作用及地幔交代作用所形成的各种地幔端员,如 EM I、EM II 型富集地幔、HIMU 及 FOZO 地幔端员。

俯冲带的熔融一类是减压熔融,一些几乎无水的原始弧玄武岩的存在是其证明。它与在洋中脊下发生的熔融作用相似;另一类则是助熔剂熔融(fluxed melting),或称流动熔融。这在俯冲带是最重要的,它是指由俯冲的物质(沉积物和玄武质俯冲板片)脱水作用而产生大量 H₂O 和其它助熔剂进入地幔楔,使地幔岩石发生熔融。它可分为两个亚类:流体助熔(流动)熔融与熔体助熔(流动)熔融。前者是指富水的流体加入固态的热的地幔楔橄榄岩中发生部分熔融^[3~5],这又可称为饱和流体的熔融,简称 flush。熔体助熔熔融是指俯冲的沉积物和玄武岩所产生的富水熔体与上覆地幔楔橄榄岩相互作用(熔体交代作用)而产生的地幔橄榄岩熔融作用,生成了混合熔体^[6,7],这种熔融又称为无流体的熔融,

即无独立的流体相参与的熔融^[8]。

对岛弧岩浆岩形成过程的认识经历了板片熔融—流体交代熔融—板片熔融的阶段。1968 年, T. H. Green 和 A. E. Ringwood^[9]就提出了直接由玄武质洋壳俯冲到高压和变质为榴辉岩相而部分熔融、形成岛弧钙碱性安山岩的认识。这是岛弧安山岩成因的经典模型,但随着研究的深入,人们对此产生了怀疑,并认为俯冲带上方地幔楔中受交代的橄榄岩是火山弧岩石的主要源岩^[10~13]。许多人认为俯冲板片不够热,达不到熔融温度,只能释放出含水流体。但 J. D. Myers 等^[11]却一直支持板片熔融在岛弧岩浆作用中起重要作用的观点, M. J. Defant^[12]等强调板片熔体是一种非常特殊的钙碱性安山岩和英安岩——埃达克岩的重要源区物质,且近年来愈来愈多的研究支持这一认识^[15~19]。

俯冲带的流体交代作用过程可概括为:俯冲洋壳脱水,产生富大离子亲石微量元素(K、Rb、Sr、U、Th 和 REE 等)的流体进入俯冲带上方的地幔楔,发生交代作用,继而使地幔楔的地幔岩部分熔融,形成岛弧岩浆岩。随俯冲深度的增加,变质相由角闪岩相过渡为榴辉岩相,地幔楔部分熔融部位加深,部分熔融程度由大变小。与此相对应,在岛弧岩浆岩系统中靠海洋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(钙碱性)和橄榄玄粗岩系火山岩、碱性岩。相应地,在横越岛弧或活动大陆边

收稿日期:2004-06-03 收到,07-15 改回

基金项目:国家自然科学基金项目(40373017)和国家重点基础研究发展规划项目(2001CB409803)资助

第一作者简介:赵振华(1941—),男,研究员,地球化学专业。

缘,随俯冲深度的增加,由大洋向大陆方向形成微量元素成分(含量、比值)呈极性变化,如 $K \rightarrow Rb \rightarrow Sr \rightarrow Ba \rightarrow Cs \rightarrow P \rightarrow Pb \rightarrow U \rightarrow Th \rightarrow REE$ 等逐渐增加^[20,21],一些典型的元素比值,如 B/Be 、 Ce/Pb 、 U/Zr 、 Th/U 、 Cs/Th 、 Ba/Th 和 Be/Th 等也发生系统变化,它们是俯冲板片压力和温度的函数,即板片俯冲深度和变质程度的函数。随变质程度的增加, B/Be 、 Cs/Th 、 Th/U 、 U/Zr 等降低, Ce/Pb 增加。随俯冲深度的增加, B/Be 、 Ba/Th 、 Be/Th 和 B/Pb 降低, Ce/Pb 、 U/Zr 、 Th/U 和 Cs/Ba 、 Be/Th 增加^[22]。

近年来,埃达克岩^[23~28]和富铌岛弧玄武岩(NEB)^[29~33]及富镁安山岩(MA或HMA)^[5,6,17,32~37,58]的发现,使对俯冲带的火成岩组合及其岩浆作用有了更深刻的认识。这三种岩石组合的发现,打破了俯冲带火成岩单一成因的传统模式,即俯冲板片脱水,形成富水和大离子亲石元素的流体,这种流体与地幔楔相互作用而使地幔楔部分熔融,形成正常的岛弧钙碱性火山岩:玄武岩-安山岩-英安岩-流纹岩组合。而埃达克岩、富铌玄武岩和富镁安山岩的形成,是俯冲板片部分熔融所产生的初始埃达克质熔体在上升过程与上覆地幔楔发生相互作用(隐性的或显性的),或使地幔楔发生部分熔融,形成富铌玄武岩和富镁安山岩。这表明,俯冲带的壳幔相互作用除俯冲板片脱水形成的流体交代作用外,由板片熔融形成的熔体交代作用也是非常重要的。

1 埃达克岩-富铌玄武岩-富镁安山岩

这是一套与俯冲洋壳板片熔融密切相关的岩石组合,它们不同于正常的岛弧钙碱性火山岩,F. G. Sajona 等^[38]将其称为埃达克岩家族。

埃达克岩是一种中酸性火成岩,由安山质、英安质和流纹质系列火山和(或)侵入岩组成。其主要矿物组合为斜长石+角闪石±黑云母±辉石±不透明矿物,岩石化学特点是 $SiO_2 \geq 56\%$,富 Al_2O_3 ($\geq 15\%$),富 Na_2O ($Na_2O > K_2O$)。与正常岛弧安山岩-英安岩-流纹岩的区别是高 Sr ($>400 \mu g/g$),相对富集 Eu ,在球粒陨石标准化图解中 Eu 为正异常 ($Eu/Eu^* > 1$),强烈亏损重稀土和 Y ($Y \leq 18 \mu g/g$, $Yb \leq 1.9 \mu g/g$); Sr/Y 高 (>20), $La/Yb > 20$ 。在 $Sr/Y-Y$ 图解中,埃达克岩与正常岛弧岩浆岩落在两个明显不同的区域^[25,27]。此外,埃达克岩石的 B/Be 值低,平均 6.76 ± 1.01 ,而正常岛弧岩石富 B , B/Be 值高 (11.3 ± 6.1),中美洲火山弧岩为 36.5 ± 30.2 ;埃达克岩石 Pb/Nd 值低 ($0.329 \sim 0.390$),而正常弧岩浆为 0.499 ± 0.280 (汤加)与 $0.494 \pm$

0.161 (新不列颠岛弧)^[39]。

富铌玄武岩是 F. G. Sajona 等^[35]提出的。此前,M. K. Reagan 等^[40]在研究哥斯达黎加 Turrialba 和墨西哥 Baja California^[41],以及 Southern Washington Cascade^[42,43]与巴拿马 La Yeguda^[44]的镁铁质熔岩时,曾根据这些熔岩的特征元素与微量元素组合,如高 TiO_2 ($1\% \sim 2\%$) 和低 $LILE/HFSE$ (大离子亲石元素/高场强元素)、低 $LREE/HFSE$ 、 Nb 含量高 ($>20 \mu g/g$),而将这些岩石称为高铌玄武岩。富铌玄武岩的 Nb 含量低于高铌玄武岩并有一定的变化,但其 Nb 含量 ($7 \sim 16 \mu g/g$) 明显高于正常洋内弧玄武岩,具有与高铌玄武岩相似的微量元素组合,岩石类型为玄武岩和玄武安山岩,富 Na ($Na_2O/K_2O > 1.0$),与正常岛弧玄武岩相比,具有较高的 P_2O_5 和 TiO_2 、 Zr 、 Sc 、 V , $(Nb/Th)_{PM}$ 值高 (>0.6), $(La/Nb)_{PM}$ 比值低 (<2.0 , 很少 <0.7),在原始地幔标准化蛛网图上, Nb 呈弱正异常或负异常。上述特征表明,富铌玄武岩是俯冲板片产生的熔体交代地幔楔熔融的产物。

富镁安山岩(高镁安山岩): SiO_2 为 $56\% \sim 54\%$,镁含量较高, $Mg^{\#}$ 为 $0.64 \sim 0.50$, MgO $3.5\% \sim 7.0\%$, Cr 、 Ni 含量分别为 $531 \sim 106$ 和 $230 \sim 21 \mu g/g$ 。与正常安山岩相比, Th 、 $LREE$ 含量高,在一定 Mg 含量范围内, Yb 含量稳定, $HREE$ 分异明显, $(Nb/Th)_{PM}$ 和 $(Nb/La)_{PM}$ 值低^[32],在以 MgO 为横坐标的哈克图解中,富镁安山岩显示与普通安山岩明显不同的变化趋势,而与富铌玄武岩密切相关。

M. J. Defant 等^[15]将阿留申群岛中 Adak 岛的高 $Mg^{\#}$ 安山岩称为埃达克岩、方辉安山岩(sanukitoids)及 bajaites。G. M. Yogodzinski 等^[17]将富镁安山岩分为埃达克型与 PiiP 型。前者具有与埃达克岩相似的 La/Yb 、 Sr 及高场强元素含量,但 $Mg^{\#}$ 、 MgO 、 Cr 、 Ni 明显高于埃达克岩; PiiP 型富镁安山岩的 $Mg^{\#}$ 、 MgO 、 Cr 、 Ni 、 Co 含量更高,而 K 和大离子亲石元素含量低, La/Yb 及 Sr 明显比埃达克岩低。

富镁或高镁安山岩是原始埃达克岩浆与地幔橄榄岩强烈相互作用而发生混合作用的产物^[32]。

目前在环太平洋(南、北美洲、俄罗斯的堪察加、日本、菲律宾等)均发现了埃达克岩、富铌玄武岩、富镁安山岩及其岩石组合。其时代主要为显生宙,特别是新生代的,但也有晚太古代的^[32]。我们也相继在新疆北部及秦岭发现了埃达克岩、富铌玄武岩及富镁安山岩组合^[27,36,37,45~47]。

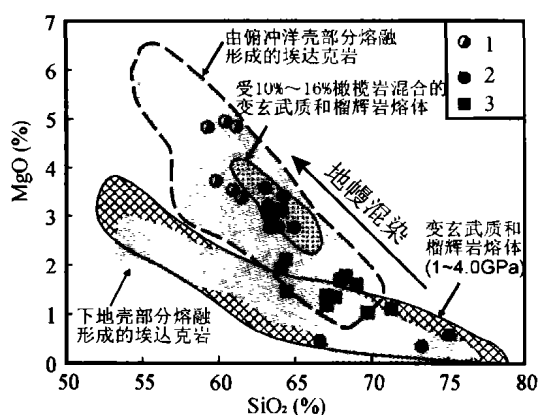
2 板片熔体与地幔楔的交代(相互)作用

综合我们在新疆北部发现埃达克岩、富铌玄武

岩和富镁安山岩组合及国外同类研究成果,认为这种岩石组合是俯冲板片熔融产生的埃达克质熔体,即熔体交代上覆地幔楔作用或熔体助熔的结果。这种熔融作用产生的混合熔体中大部分(90%以上)相容元素如 Mg、Fe、Ni 来自地幔楔岩石,而大量的碱金属和不相容微量元素来自俯冲板片形成的熔体^[48]。这种熔体交代的地球化学特征概括如下:

(1)原始埃达克质熔体 MgO 、 $Mg^\#$ 明显增加, SiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 降低。 MgO 、 $Mg^\#$ 明显增加, SiO_2 降低是原始埃达克质熔体与地幔楔橄榄岩相互作用或原始埃达克质熔体交代作用的重要标志。实验表

明^[49],玄武岩部分熔融形成的熔体 $Mg^\# < 45$, Cook 岛中高 $Mg^\#$ (68)、低 SiO_2 (58%) 的埃达克岩需要加入 10%~20% 的地幔橄榄岩。R. P. Rapp 等实验表明^[50],加入 10% 橄榄岩可使 $Mg^\#$ 从 44 升高到 55,图 1 和图 2 为埃达克岩与玄武岩实验熔体,以及富 Mg 安山岩、埃达克岩及正常岛弧火山岩的 SiO_2 - MgO 关系图解。阿拉套山、西天山及准噶尔北缘的埃达克岩、富铌玄武岩投影后,可见原始埃达克质熔体交代作用的 MgO 增加和 SiO_2 降低的明显趋势。图 3 中可见原始埃达克质熔体发生交代作用后, K、Na、Si 含量的明显降低。



1. 阿拉套山富 Nb 玄武岩; 2. 阿拉套山埃达克岩; 3. 阿吾拉勒埃达克岩

图 1 埃达克岩与玄武岩实验熔体的 SiO_2 - MgO 关系图
Fig. 1 SiO_2 - MgO diagram of adakites and basaltic experimental melt

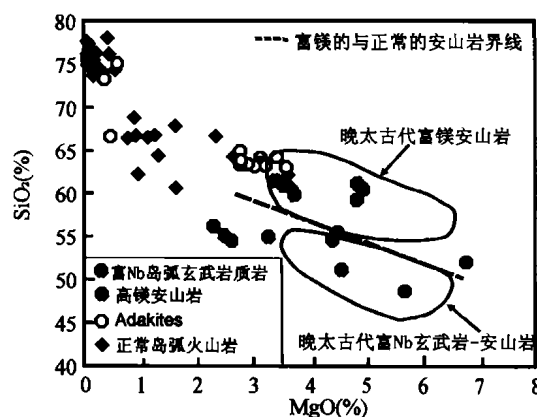


图 2 埃达克岩、富镁安山岩、富铌玄武岩和正常岛弧火山岩的 SiO_2 - MgO 关系图

Fig. 2 SiO_2 - MgO diagram for comparison of adakites, magnesian andesites, Nb-enriched basalts and normal arc volcanic rocks

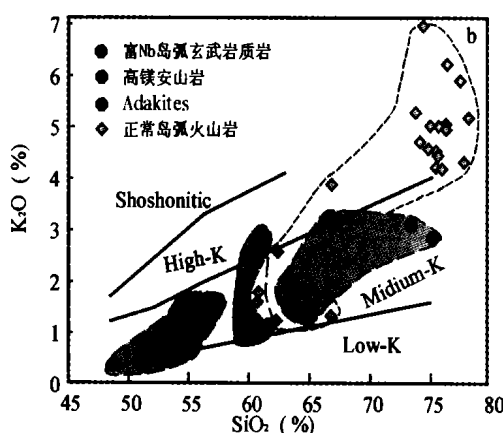
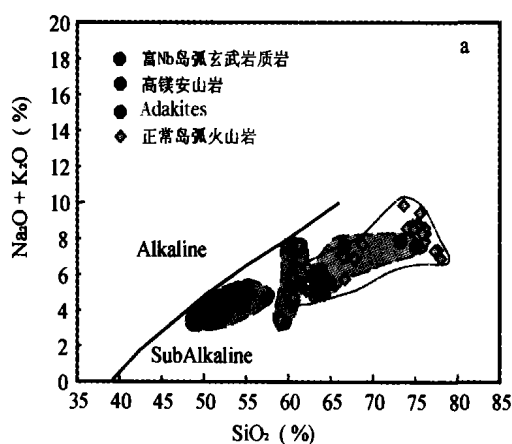


图 3 埃达克岩、富镁安山岩、富铌岛弧玄武岩和正常岛弧火山岩的 K、Na、Si 比较

Fig. 3 Diagrams of K, Na, Si for comparison of adakites, magnesian andesites, Nb-enriched basalts and normal arc volcanic rocks

(2) Nb、 TiO_2 、 P_2O_5 等高场强元素含量增加。正常岛弧火山岩是由源自俯冲板片脱水产生的流体交代地幔楔发生部分熔融所致,这种富水流体亏损高场强元素 Nb(Ta)、Ti、P 等,这是因为这些元素的流体/岩石分配系数很小($\ll 1$),在流体交代地幔

楔形成的正常岛弧火山岩中出现显著的 Nb(Ta)、Ti 负异常(微量元素原始地幔标准化蛛网图上相对于相邻元素 K、La 和 Eu、Gd)(图 4),而在熔体中分配系数明显大于流体,因而当俯冲板片产生的熔体与地幔岩相互作用时,形成的富铌玄武岩中 Nb、Ta、

Ti、P 等增加, Nb 为正异常或微弱负异常, $(\text{Nb}/\text{La})_{\text{PM}} = 0.56 \sim 1.28$, 无 Ti 负异常至 Ti 正异常(图

4), 在 $\text{P}_2\text{O}_5\text{-TiO}_2$ 图上(图 5)明显不同于正常岛弧火山岩。

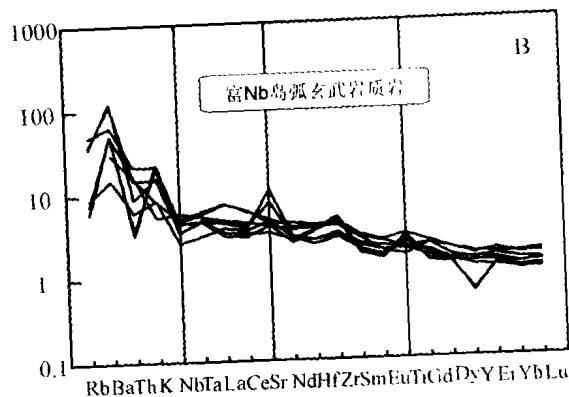
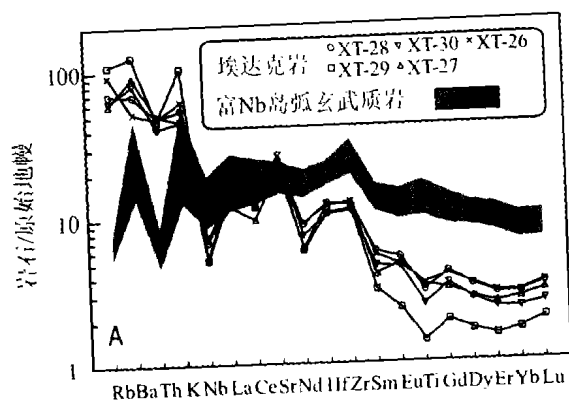


图 4 埃达克岩与富铌岛弧玄武岩的原始地幔(PM)(A)和 MORB(B)标准化微量元素图解
Fig. 4 PM-and MORB-normalized multi-elements spidergrams for adakites and Nb-enriched basalts

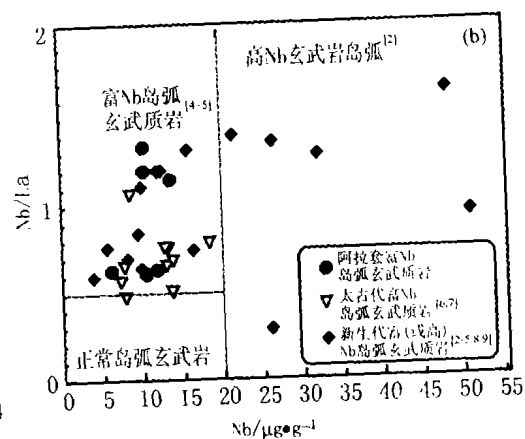
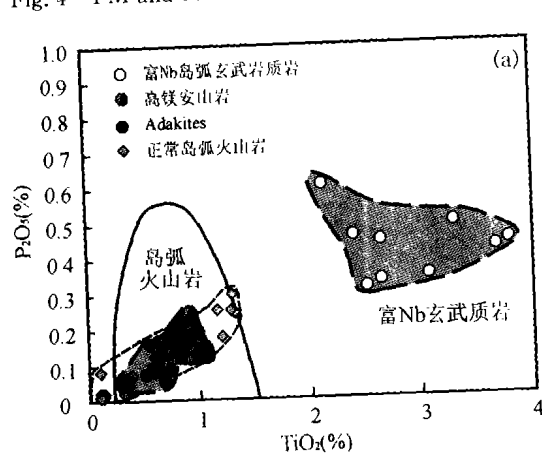


图 5 富铌岛弧玄武岩与正常岛弧火山岩 $\text{P}_2\text{O}_5\text{-TiO}_2$ 及 Nb/La-Nb 比较
Fig. 5 Diagrams of $\text{P}_2\text{O}_5\text{-TiO}_2$ and Nb/La-Nb for the comparison of Nb-enriched basalts with normal arc volcanic rocks

(3) La/Yb 降低, Nd/Sr 增加。图 6 给出了富铌玄武岩、高镁安山岩、埃达克岩和正常岛弧火山岩的 Nd/Sr - La/Nb 和 La/Yb - La 比较。由图可见,富铌岛弧玄武岩以低 Nd/Sr 、高 La/Yb 与埃达克岩、富镁安山岩相似,而与正常岛弧岩石明显不同,但与埃达克岩相比,富铌玄武岩和富镁安山岩 La/Yb 降低, Nd/Sr 增加。

应该指出的是,上述板片熔体与地幔楔橄榄岩相互作用的地球化学特征,主要取决于板片熔体交代地幔楔岩石的比例(即熔体/岩石比)以及微量元素的矿物/熔体分配系数。熔体交代实质是板片熔体被“稀释”,属 Na 交代作用,而流体交代属 K 交代作用^[11]。

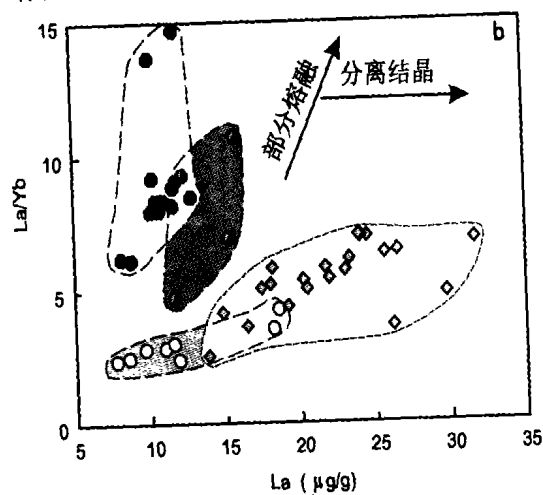
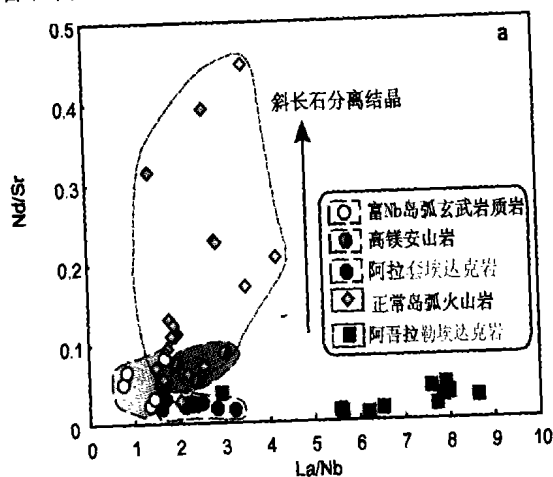


图 6 俯冲带不同类型火山岩 Nd/Sr - La/Nb 和 La/Yb - La 图解
Fig. 6 Diagrams of Nd/Sr - La/Nb and La/Yb - La for different types of volcanic rocks in subduction zone

3 玄武质板片发生熔融的条件和模式

埃达克岩高 Sr/Y 和低 Y、Yb、HREE 及 Sr、Eu 正异常等特点,反映了俯冲板片发生熔融形成埃达克岩浆的条件,即板片(玄武质岩石)在角闪岩相向榴辉岩相过渡或榴辉岩相条件下发生部分熔融。在这种高压条件下,斜长石不稳定,部分熔融的残留相矿物组合为石榴子石+含 Ti 矿物+辉石±角闪石。富 Sr、Eu 的斜长石熔融及富 Y 和 HREE 的石榴子石残留,使板片熔体具有上述埃达克岩石的地球化学特征。拉斑玄武岩-H₂O(5%)体系的压力-温度相图^[52]表明(图 7),石榴子石(Ga)稳定、斜长石(PL)不稳定的区域包括 Am(角闪石)+Cpx(单斜

辉石)+Ga+L 和 Ga+Cpx+L 两个温压区,分别对应于角闪岩相向榴辉岩相过渡或榴辉岩相条件,它们的最小压力和温度条件应大于 100 MPa 和 650℃。在正常的地温梯度条件下,地温梯度线不与含 H₂O 的玄武岩固相线相交,玄武质岩石不产生部分熔融;在高的地温梯度条件下(如俯冲带和陆内地幔隆升区),地温梯度线能与含 H₂O 的玄武岩固相线相交,在角闪岩相向榴辉岩相过渡或榴辉岩相温压域,含 H₂O 玄武质岩石发生部分熔融产生埃达克质熔体。R. P. Rapp 等^[50,53]也证实,玄武质岩石在压力大于 120 MPa(相当于地壳深处 40 km 以上)的条件下能够部分熔融出具有埃达克岩成分特征的熔体。

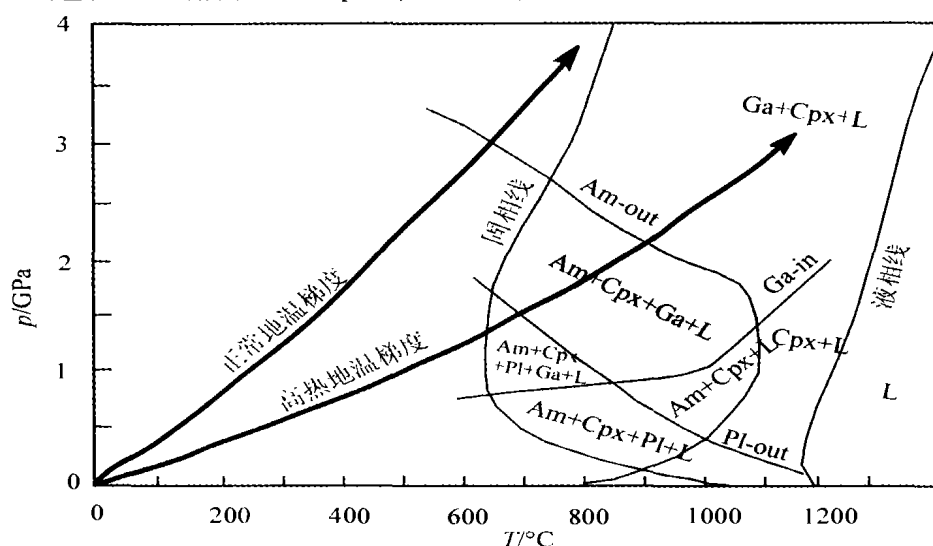


图 7 拉斑玄武岩-H₂O 体系 p - T 相图(据 Green, 1982)^[52]

Fig. 7 p - T diagram of tholeiitic compositions with 5% added H₂O (after Green, 1982)

满足上述条件的方式主要有以下三种模式:

(1)大洋板片俯冲熔融^[15]或洋脊俯冲、碰撞,形成板片窗导致洋脊熔融:年轻(≤ 25 Ma,最大可达 30 Ma)的大洋板片保持高热状态,当俯冲到 70~90 km 时可发生熔融^[24,44],而对于发育在较老(> 50 Ma)的、冷的消减带上(如中、北安第斯地区)的埃达克质岩石, M. A. Gufscher 等^[34]认为可用冷板片低角度缓俯冲(flat subduction)地幔加热熔融来解释,即较老的、较冷的下降板片由于浮力作用,可在大约 80 km 深处的楔状软流圈地幔中近水平消减,并逐渐被加热而发生熔融。

上述埃达克岩的产出指示了俯冲消减作用的早期阶段。已有研究表明,中美洲哥斯达黎加东南的 5.8~2.0 Ma 的埃达克质和碱性熔岩是由下述过程形成:Cocos 洋脊俯冲、与海沟碰撞,形成板片窗,随之软流圈通过板片窗进入 Caribbean 地幔楔,导致

俯冲的洋脊边缘发生熔融,形成埃达克质和碱性弧后熔岩^[52]。还有资料说明,墨西哥 Vizcaino 半岛晚中新世的埃达克岩的微量元素和 Sr、Nd、Pb 同位素特征与蚀变的洋中脊玄武岩相似,并靠近古海沟,高地热^[33]。据此判断它们是由东太平洋洋脊(EPR)俯冲到 Baja California 下面 30~50 km,随之软流圈窗打开,导致边缘熔融形成埃达克质岩浆,该岩浆与地幔楔相互作用形成与之组合的富铯玄武岩和富镁安山岩。

(2)新底侵的玄武质下地壳发生部分熔融:如南美秘鲁科迪勒拉 Blamk 花岗岩基、北美西部 Peninsular Ranges 中酸性侵入体和新西兰^[23,50]。新底侵的玄武质岩石即使地温梯度增加,又使地壳增厚(40 km 以上),这种高温高压条件可使玄武质下地壳发生熔融,形成埃达克岩。此外,地壳加厚还可能诱发由于向榴辉岩的转变而发生拆沉作用,其结果一方面导致软流圈上涌,加热下地壳而发生熔融,形

成埃达克岩浆,另一方面拆沉的下地壳物质在热地幔物质作用下,也可发生熔融形成埃达克质岩浆^[18,56]。我们用底侵玄武质下地壳部分熔融解释西天山阿吾拉勒山地区和长江中下游的埃达克岩的成因^[25,27]。侯增谦等^[57]认为冈底斯岩带的埃达克质斑岩的一种可能源岩是加厚的玄武质下地壳,其形成的熔体有富集地幔加入或受到上地壳混染。张旗等^[26]认为中国东部燕山期埃达克岩为下地壳麻粒岩部分熔融所致,并将其称为C型埃达克岩。

这种方式形成于俯冲作用已结束的后碰撞阶段。由底侵的下地壳或下地壳部分熔融形成埃达克质岩石的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr初始值略高于由俯冲板片熔融形成的埃达克质岩石,而¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd值较低。在岩石组合上则常与钾质火成岩(如橄榄玄粗岩系)有密切的时空关系^[47],少见富镁安山岩和富铌玄武岩。在西藏冈底斯,除橄榄玄粗岩系火山岩外,还有超钾岩石^[57]。这与俯冲作用阶段由俯冲板片熔融产生熔体并与地幔楔发生相互作用所产生的岩石组合不同。

(3)断离(break off)或撕裂(tear)的板片发生熔融:俯冲过程中俯冲板片可能发生撕裂或断离,断离的板片滞留在地幔楔中^[58](如Makovsky等1999年据地球物理资料发现青藏地区30 km深处有俯

冲的残留洋壳板片),形成滞留板片(stalled slab)或死的板片(dead slab)^[59],或称残留板片(remnant slab)。当弧—弧、陆—弧或弧—大洋高原发生碰撞而停止俯冲时,这种滞留板片及地幔楔可发生熔融作用;或在板块运动由汇聚向转换边界转变,或俯冲板片的倾斜和向海沟方向的后退,都会使断裂、滞留的板片发生熔融^[59]。这实质是洋壳的拆沉作用。用这种模式可以解释环太平洋的大型-超大型斑岩和浅成热液铜-金矿床^[59]。G. M. Yogodzinski等^[60]认为堪察加岛弧北部的埃达克岩是由板片被撕裂,导致软流圈地幔上涌,使板片边缘发生熔融而形成的。侯增谦等^[57]指出冈底斯埃达克质斑岩是印度板块断离引发软流圈上涌,导致白垩纪俯冲的变质成因榴辉岩洋壳残片部分熔融而形成。汪洋^[61]认为西天山阿吾拉勒的埃达克质岩石是保留于造山带之下地幔中的残留俯冲板片,在后期地幔热事件影响下发生熔融的产物。

综上所述,俯冲带复杂的、丰富多彩的壳幔相互作用产生了多种岩浆岩及不同的岩浆岩组合;相应地,也带来了丰富的成矿物质而形成了众多大型-超大型矿床,成为地质学、岩石学、矿床学和地球化学研究的热点地区。

参考文献(Reference):

- [1] Kerr B C, Klenpeneer S. Wide-angle imaging of the Mariana subduction factory [J]. EOS, Trans. AGU., 2002, 84(47), Full meet suppl.
- [2] Tatsumi Y. The subduction factory: It's role in the evolution of the Earth, ocean drilling in the 21st century [J]. OD21 Newsletter, 2003, 14(3): 5.
- [3] Abe N, Arai S, Yurimoto H. Geochemical characteristics of the uppermost mantle beneath the Japan island arcs: Implications for upper mantle evolution [J]. Phys. Earth Planet. Int., 1998, 107: 233—248.
- [4] Eiler J, Crawford A, Elliott T, Fanley K A, Valley J V, Stolper E M. Oxygen isotope geochemistry of oceanic arc lavas [J]. J. Petrol., 2000, 41: 229—256.
- [5] Grove T L, Elkins Tanton L T, Parman S W, Cartterjee N, Muntener O, Gaetani G A. Fractional crystallization and mantle melting controls on calc-alkaline differentiation trends [J]. Contrib. Mineral. Petrol., 2003, 145(5): 515—533.
- [6] Kelemen P B. Genesis of high Mg[#] andesites and the continental crust [J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1995, 120: 1—19.
- [7] Yogodzinski G M, Kelemen P B. Slab melting in the Aleutians: Implications of an ion probe study of clinopyroxene in primitive adakite and basalt [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1998, 158: 53—65.
- [8] Schmidt M W, Poli S. Generation of mobile components during subduction of oceanic crust [A]. Rudnick R L, Holland H D eds. Treatise on geochemistry (Vol. 3) [M]. Amsterdam: Elsevier, 2003. 567—588.
- [9] Green T H, Ringwood A E. Genesis of the calc-alkaline igneous rock suite [J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1968, 18: 105—162.
- [10] Stern C R. Melting products of olivine tholeiite basalt in subduction zones [J]. Geology, 1974, 2: 227—230.
- [11] Kay R W. Volcanic arc magmatogenesis implications for element recycling in the crust-upper mantle system [J]. J. Geol., 1980, 88: 497—522.
- [12] Perfit M R, Gust D A, Bence A F, Arculus R J, Taylor S R. Chemical characteristics of island-arc basalts implications for mantle sources [J]. Chem. Geol., 1980, 30: 227—256.
- [13] Gill J B. Orogenic andesites and plate tectonics [M]. New York: Springer, 1981.
- [14] Myers J D, Marsh B D. Aleutian lead isotopic data: Additional evidence for the evolution of lithospheric plumbing systems [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1987, 51: 1833—1842.
- [15] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. Nature, 1990, 347: 662—665.
- [16] Drummond M S, Defant M J, Kepezhinskis P K. The petrogenesis of slab derived trondhjemite-tonalite-dacite/adakite magmas [J]. Trans. R. Soc. Edinburgh: Earth Sci., 1996, 87: 205—216.
- [17] Yogodzinski G M, Kay R W, Volinets O N, Koloskov A V, Kay S M. Magnesian andesite in the western Aleutian Komandorsky region: Implications for slab melting and processes in the mantle wedge [J]. Geol. Soc. Am. Bull., 1995, 107: 505—519.
- [18] Kay S M, Ramos V A, Marquez M. Evidence in Cerro Pampa volcanic rocks for slab-melting prior to ridge-trench collision in southern South America [J]. Geol., 1993, 101: 703—714.

- [19] Stern C R, Kilian R R. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Austral volcanic zone[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1996, 123: 263—281.
- [20] Müller D, Groves D I. Potassic Igneous rocks and associated gold-copper mineralization [M]. Berlin: Springer, 1997. 11—39.
- [21] 赵振华. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 112—129.
Zhao Zhenhua. Principle of trace element geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1997. (in Chinese)
- [22] Morris J D, Ryan J G. Subduction zone processes and implications for changing composition of the upper and lower mantle [A]. Holland H D, Turekian K K eds. *Treatise on geochemistry* (Vol. 2)[M]. Amsterdam: Elsevier, 2003. 456—462.
- [23] Atherton M P, Petford N. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust [J]. *Nature*, 1993, 362: 144—146.
- [24] Martin H. Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids[J]. *Lithos*, 1999, 46: 411—429.
- [25] 王强, 赵振华, 熊小林, 许继峰. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自沙漠 adakite 质富钠石英闪长玢岩的证据[J]. *地球化学*, 2001, 30(4): 353—362.
Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, Xu Jifeng. Melting of the underplated basaltic lower crust: Evidence from the Shaxi adakitic sodic quartz diorite-porphyrites, Anhui Province, China[J]. *Geochimica*, 2001, 30(4): 353—362. (in Chinese with English abstract)
- [26] 张旗, 王焰, 钱青, 杨进辉, 王元龙, 赵太平, 郭光军. 中国东部中生代埃达克岩的特征及其构造-成矿意义[J]. *岩石学报*, 2001, 17(2): 236—244.
Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing, Yang Jinhui, Wang Yuanlong, Zhao Taiping, Guo Guangjun. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the Mesozoic adakites in eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(2): 236—244. (in Chinese with English abstract)
- [27] 熊小林, 赵振华, 白正华, 梅厚钧, 王一先, 王强, 许继峰, 牛贺才, 包志伟. 西天山阿吾拉勒 adakite 型钠质中酸性岩及地壳垂向增生[J]. *科学通报*, 2001, 46(4): 281—287.
Xiong Xiaolin, Zhao Zhenhua, Bai Zhenghua, Mei Houjun, Wang Yixian, Wang Qiang, Xu Jifeng, Niu Hecai, Bao Zhiwei. Adakite-type sodium-rich rocks in Awulale mountain of west Tianshan: Significance for the vertical growth of continental crust[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2001, 46(10): 811—817. (in Chinese)
- [28] 赵振华, 白正华, 熊小林, 梅厚钧, 王一先. 西天山北部晚古生代火山-浅侵入岩浆岩⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素定年 [J]. *地球化学*, 2003, (4): 317—327.
Zhao Zhenhua, Bai Zhenghua, Xiong Xiaolin, Mei Houjun, Wang Yixian. ⁴⁰Ar-³⁹Ar chronological study of Late Paleozoic volcanic-hypabyssal igneous rocks in western Tianshan[J]. *Geochim.*, 2003, 32(4): 317—327. (in Chinese with English abstract)
- [29] Sajona F G, Maury R G, Bellon H, Cotton J, Defant M. High field strength element enrichment of Pliocene-Pleistocene island arc basalts, Zamboanga Peninsula, Western Mindanao (Philippines)[J]. *J. Petrol.*, 1996, 37(3): 693—726.
- [30] Kepezhinskas P K, Defant M J, Drummond M S. Progressive enrichment of island arc mantle by melt-peridotite interaction inferred from Kamchatka xenoliths [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1996, 60: 1217—1229.
- [31] Hollings P, Kerrich R. An Archean arc basalt-Nb-enriched basalt-adakite association: The 2.7 Ga confederation assemblage of the Birch-Uchi greenstone belt, Superior Province [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2000, 139: 208—226.
- [32] Polat A, Kerrich R. Magnesian andesites, Nb-enriched basalt-andesites, and adakites from Late-Archean 2.7 Ga Wawa greenstone belts, Superior Province, Canada: Implications for Late Archean subduction zone petrogenetic processes [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2001, 141: 36—52.
- [33] Aguillon-Robles A, Caimus T, Bellon H, Maury R C, Cotton J, Bougois J, Michard F. Late Miocene adakite and Nb-enriched basalts from Vizcaino Peninsula, Mexico: Indicators of East Pacific Rise subduction below southern Baja California [J]. *Geology*, 2001, 29: 531—534.
- [34] Xu J F, Wang Q, Yu X Y. Geochemistry of high-Mg andesites and adakitic andesite from the Sanchazi block of the Mian-Lue ophiolitic mélange in the Qinling Mountains, central China: Evidence of partial melting of the subducted Paleo-Tethyan crust [J]. *Geochim. J.*, 2000, 34: 359—377.
- [35] Sajona F G, Maury R C, Bellon H, Cotton J, Defant M J, Purbellier M, Rangin C. Initiation of subduction and the generation of slab melts in western and eastern Mindanao, Philippines [J]. *Geology*, 1993, 21: 1007—1010.
- [36] 许继峰, 梅厚钧, 于学元, 白正华, 牛贺才, 陈繁荣, 郑作平, 王强. 准噶尔北缘晚古生代岛弧中与俯冲作用有关的 adakite 火山岩的发现及其大地构造意义[J]. *科学通报*, 2001, 46(8): 684—687.
Xu Jifeng, Mei Houjun, Yu Xueyuan, Bai Zhenghua, Niu Hecai, Chen Fanrong, Zheng Zuoping, Wang Qiang. Adakites related to subduction in the northern margin of Junggar arc for the Late Paleozoic: Products of slab melting [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2001, 46: 1312—1316. (in Chinese)
- [37] 王强, 赵振华, 白正华, 熊小林, 梅厚钧, 许继峰, 包志伟, 王一先. 新疆阿拉套山石炭纪埃达克岩、富 Nb 岛弧玄武岩: 板片熔体与地幔橄榄岩相互作用及地壳增生[J]. *科学通报*, 2003, 48(2): 1342—1349.
Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Bai Zhenghua, Xiong Xiaolin, Mei Houjun, Xu Jifeng, Bao Zhiwei, Wang Yixian. Carboniferous adakites and Nb-enriched arc basaltic rocks association in Alatau mountains, north Xinjiang: Interaction between slab melt and mantle peridotite and implication for crustal growth [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2003, 48(19): 2108—2115. (in Chin.)
- [38] Sajona F G, Maury R C. Association of adakites with gold and copper mineralization in the Philippines [J]. *Earth and Planet. Sci.*, 1998, 326(1): 27—34.
- [39] Kamber B S, Ewart A, Collerson K D, Bruce M C, McDonald D. Fluid-mobile trace element constraints on the role of slab melting and implications for Archaean crustal growth models [J]. *Mineral. Petrol.*, 2002, 144: 38—56.
- [40] Reagan M K, Gill J B. Coexisting calcalkaline and high-niobium basalts from Turrialba Volcano, Costa Rica: Implications for residual titanates in arc magma sources [J]. *J. Geophysical Research*, 1989, 94: 4619—4633.
- [41] Verma S P, Nelson S A. Isotopic and trace element: Constraints on the origin and evolution of alkaline and calc-alkaline magmas in the northwestern Mexican volcanic belt [J]. *J. Geophysical Research*, 1989, 94: 4531—4544.
- [42] Leaman W P, Smith D R, Hildreth W, Palacz Z, Rogers N. Compositional diversity of Late Cenozoic basalts in a transect across the Southern Washington Cascades: Implications for subduction zone magmatism [J]. *J. Geophysical Research*, 1990, 95: 19561—19582.

- [43] Defant M J, Jackson T E, Drummond M S, de Boer J Z, Belton H, Feigenson M D, Maury R C, Steward R H. The geochemistry of young volcanism throughout western Panama and southeastern Costa Rica: An overview[J]. *J. Geol. Soc. (London)*, 1992, 149: 569—579.
- [44] Defant M J, Drummond M S. Potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc[J]. *Geology*, 1993, 21: 547—550.
- [45] Niu Hecai, Xu Jifeng, Yu Xueyuan, Chen Fanrong, Zheng Zuoping. Discovery of Mg-rich volcanic rock series in western Altay area, Xingjiang and it's geologic significance[J]. *Chinese Sci. Bull.*, 1999, 44(18): 1685—1687.
- [46] 张海祥, 牛贺才, Sato H, 单强, 于学元, Ito J, 张旗. 新疆北部晚古生代埃达克岩-富铌玄武岩组合: 占亚洲洋板块向南俯冲的证据[J]. *高校地质学报*, 2004, 10(1): 106—113. Zhang Haixiang, Niu Hecai, Sato H, Shan Qiang, Yu Xueyuan, Ito J, Zhang Qi. Late Paleozoic adakite and Nb-enriched basalt from northern Xinjiang: Evidence for the southward subduction of the Paleo-Asian ocean[J]. *Geol. J. Chin. Univ.*, 2004, 10(1): 106—113. (in Chinese with English abstract)
- [47] Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, Wang Qiang, Bai Zhenghua, Xu Jifeng, Qiao Yulou. Association of Late Paleozoic adakitic rocks and shoshonitic volcanic rocks in the western Tianshan, China[J]. *Acta Geol. Sinica*, 2004, 78(1): 68—72.
- [48] Kelemen P B, Hanghol K, Green A R. One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust[A]. Rudnick R L, Holland H D, Turekian K K, eds. *Treatise on geochemistry* (Vol. 3)[M]. Amsterdam: Elsevier, 2003. 593—649.
- [49] Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, Applegate G S. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa[J]. *Chemical Geology*, 1999, 160: 335—356.
- [50] Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8~32 kbar; Implication for continental growth and crust—mantle recycling[J]. *J. Petrol.*, 1995, 36: 891—931.
- [51] Kepezhinskis P K, Defant M J, Drummond M. Na metasomatism in the island-arc mantle by slab melt-peridotite interaction: Evidence from mantle interaction; Evidence from mantle xenoliths in the north Kamchatka arc[J]. *J. Petrol.*, 1995, 36: 1505—1527.
- [52] Green T H. Anatexis of mafic crust and high pressure crystallization of andesite[A]. *Andesite-orogenic andesite and related rocks*[M]. New York: John Wiley, 1982. 465—487.
- [53] Sen C, Dunn T. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5 and 2.0 GPa; Implications for the origin of adakites[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1991, 117: 391—409.
- [54] Gufscher M A, Maury R C, Eissen J P, Bourdon E. Can slab melting be caused by flat subduction? [J]. *Geology*, 2000, 28(6): 535—538.
- [55] Abratis M, Womer G. Ridge collision, slab-window formation, and the flux of Pacific asthenosphere into the Caribbean realm [J]. *Geology*, 2001, 29(2): 127—130.
- [56] Xu J F, Shinjo, Defant M J, Wang Q, Rapp R P. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of East China: Partial melting of delaminated lower continental crust? [J]. *Geology*, 2002, 30: 1111—1114.
- [57] 侯增谦, 高永丰, 孟祥金, 曲晓明, 黄伟. 西藏冈底斯中新世斑岩铜矿带: 埃达克质斑岩成因与构造控制[J]. *岩石学报*, 2004, 20(3): 239—248. Hou Zengqian, Gao Yongfeng, Meng Xiangjin, Qu Xiaoming, Huang Wei. Genesis of adakitic porphyry and tectonic controls on the Gangdese Miocene porphyry copper belt in the Tibetan orogen [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(3): 239—248. (in Chinese with English abstract)
- [58] Makovsky Y, Kelemen S L, Ratschbacher L, Ratschbacher L, Aisdorf D. Midcrustal reflector on INDEPTH wide-angle profiles—An ophiolite slab beneath the India-Asia suture in southern Tibet[J]. *Tectonics*, 1999, 18: 793—808.
- [59] Sillitoe R H. Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region[J]. *Aus. J. Earth Sci.*, 1997, (44): 373—388.
- [60] Yogodzinski G M, Lees J M, Churikova T G, Dorondor F, Woerner G, Volynets N. Geochemical evidence for the melting of subducting oceanic lithosphere at plate edges[J]. *Nature*, 2001, 409: 500—504.
- [61] 汪洋. 寻找金、铜矿床标志的埃达克岩[A]. *中国矿物岩石地球化学学会第九届学术年会论文摘要*[C]. 2003, 宁波, 21. Wang Yang. The adakite—An index for mineral prospecting of Cu-Au deposits [A]. *Abstract of 9th Annual Meeting of Chinese Society for Mineralogy, Petrology and Geochemistry* [C]. 2003, Ningbo, China, 24. (in Chinese)

Complex Mantle—Crust Interaction in Subduction Zone

ZHAO Zhen-hua, WANG Qiang, XIONG Xiao-lin

Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

Abstract: Besides the interaction of fluid derived from the dehydration of subducted slab with the mantle wedge peridotites, the interaction of slab-derived melt with overlying mantle has also been found in the subduction zone. The adakites and associated Nb-enriched basalts and magnesian andesites are the products of interaction of slab-derived melt with mantle peridotites. The interaction of adakitic slab-derived melt with mantle wedge leads to increase of Mg, Nb, Ti, P and Nd/Sr, and decrease of Si, K, Na and La/Yb. Three models have been proposed for the slab melting: 1. subduction of young oceanic slab or oceanic ridge; 2. underplating of basaltic magma in lower crusts; 3. breaking off or tearing of subducted slab.

Key words: subduction zone; slab-derived melt; adakites; Nb-enriched basalts; magnesian andesites