

# 埃达克岩与 Cu-Au 成矿作用:有待深入研究的 岩浆成矿关系\*

刘红涛 张旗 刘建明 叶杰 曾庆栋 于昌明

LIU HongTao, ZHANG Qi, LIU JianMing, YE Jie, ZENG QingDong and YU ChangMing

中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029

Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2004-02-10 收稿, 2004-03-05 改回.

Liu HT, Zhang Q, Liu JM, Ye J, Zeng QD and Yu CM. 2004. Adakite versus porphyry copper and epithermal gold deposits: a possible metallogenetic specialization of magmatism required in-deep assessment. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2):205-218

**Abstract** It has been revealed that most world-class porphyry copper and epithermal gold deposits of Cenozoic age around Pacific Rim, such as those occurred in the Central Andes and the Philippines, are spatially and temporally associated with contemporaneous adakitic magmatism. Adakite and its clan (such as high magnesian andesites (HMA), magnesian andesite (MA), Niobium-enriched basalts (NEB), and high Niobium basalts, etc.) are the host rocks of most porphyry copper deposits, and the source rocks of many epithermal Au systems. Based on the present level of understanding, the genetic relationship between them may stem from the inherent natures of adakitic magmas with sufficient fluids, high oxygen fugacity and mafic source region, which are preferred for Cu, Au and other deeply-sourced metals to be extracted and enriched, and finally economically mineralized. However, the reason(s) and mechanism responsible for this relationship are poorly understood in general. It is suggested that the close link of adakites with porphyry copper and epithermal gold deposits be a potential metallogenetic specialization of magmatism that necessitate in-deep assessment and relevant comparative studies among ore-bearing adakites, barren adakites and normal calc-alkaline rocks, to uncover the intrinsic and concealed story.

**Key words** Adakites, Porphyry copper, Epithermal gold, Metallogenetic specialization of magma, Comparative study

**摘要** 研究表明,环太平洋地区新生代斑岩铜矿和浅成热液金矿与同期的埃达克岩岩浆活动存在密切的时空与成因联系。埃达克岩是许多世界级的斑岩铜矿的容矿岩,也是许多浅成热液矿化系统的成矿母岩浆。根据目前的研究,二者成因联系可能在于埃达克岩岩浆的富流体、高氧逸度和基性源岩等固有属性,有利于 Cu、Au 等深源金属元素的萃取与富集成矿。因此,这可能是一种潜在的岩浆成矿专属性关系,但对产生这种关系的原因与机制仍然不十分清楚。这有待于今后深入开展成矿与无矿的埃达克岩、成矿的埃达克岩与非埃达克岩、无矿的埃达克岩与非埃达克岩等方面的对比研究,以揭示这种成矿专属性的本质。

**关键词** 埃达克岩;斑岩铜矿;浅成热液金矿;岩浆成矿专属性;对比研究

**中图法分类号** P588.142; P588.144; P618.41; P618.51

## 1 引言

岩浆成矿专属性作为矿床成因研究的一个重要方面,长期受到矿床学家和勘探者的重视。人们熟知的“金伯利岩与

金刚石矿床”、“蛇绿岩与豆荚状铬铁矿床”、“层状超镁铁质-镁铁质侵入杂岩与铜镍硫化物-铂族元素-钨钛磁铁矿矿床”等若干已被深入研究的岩浆成矿专属性关系,对于探索相关矿化类型的矿物质来源、成矿过程、矿化组份迁移富集机制、成矿要素之间的本质联系、矿体时空占位与矿床地质分布,

\* 本研究得到中国科学院知识创新工程重要方向项目《大兴安岭典型矿床建模、成矿规律研究及资源远景预测》(项目编号:KZCX3-SW-138)的资助

第一作者简介:刘红涛,男,1962年生,博士,副研究员,岩石地球化学专业, E-mail: htliu@mail.igcas.ac.cn

进而阐明矿床成因,都具有十分重要的理论意义,而且对于寻找特定类型矿床具有十分重要的应用价值。

近年来在全球不同地质环境中已发现了许多埃达克岩及其相关岩石的产地,而且也逐渐认识到许多斑岩型及浅成热液型 Cu-Au-Mo-Ag 矿床或矿化区与这类岩石具有密切的时空共生关系。国际上相关研究,目前主要集中在新生代埃达克质岩浆活动广泛发育的环太平洋地区,其中又以东太平洋安第斯地区和西南太平洋菲律宾群岛的有关研究相对较为深入。环太平洋其它地区,如日本岛链、堪察加半岛、阿拉斯加、科迪勒拉、巴拿马、斐济、新西兰等地区也有零星的相关报道。以上这些埃达克质岩石及相关矿化都形成于新生代,而且绝大多数与 B-型消减事件存在直接或间接的联系。此外,中国东部一些晚中生代 Cu、Au、Mo 矿化、特提斯成矿域东段的冈底斯斑岩铜矿带、古亚洲洋成矿域的土屋-延东铜矿带及蒙古国中部的 Erdanet 超大型斑岩铜矿 (Morozumi, 2003) 等,有证据表明它们也可能与埃达克质岩浆有关。因此从实证资料来看,埃达克岩与 Cu、Au 矿化之间存在的密切时空和成因关系,可能不受特定地质环境的约束,因而可能是有待深入研究的一种岩浆成矿专属性关系。本文将主要介绍国际上有关研究现状与主要进展,并试图对今后的研究方向提出倾向性意见。

## 2 埃达克岩 (adakite) 与埃达克岩家族 (adakite clan)

### 2.1 埃达克岩

埃达克岩这一术语得名于阿留申群岛中部的一个小岛-埃达克岛 (Adak Island) (Kay, 1978; Defant and Drummond, 1990; Drummond and Defant, 1990),指发育在该岛的一套具有特殊地球化学特征的钙碱性英安质-安山质火山熔岩。与岛弧正常钙碱性岩浆相比,埃达克岩具有高铝 ( $\text{Al}_2\text{O}_3 > 15\%$ )、富钠 ( $3.5\% < \text{Na}_2\text{O} < 7.5\%$ ,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} \sim 0.42$ )、高锶 ( $\text{Sr} > 400\mu\text{g/g}$ , 可达  $2000\mu\text{g/g}$ )、极度亏损重稀土元素 ( $\text{Yb} < 1.9\mu\text{g/g}$  和  $\text{Y} < 18\mu\text{g/g}$ )、无明显的负钕异常,通常过渡族元素含量较高 (如  $\text{Cr} \sim 30 \sim 50\mu\text{g/g}$ ,  $\text{Ni} \sim 20 \sim 40\mu\text{g/g}$  丰度 (Defant and Drummond, 1990; Drummond and Defant, 1990); 岩相上经常出现角闪石和黑云母斑晶 (Defant and Drummond, 1990; Martin, 1999)。正是这些特殊地球化学特征及其常见于 B-型消减环境,才使人们认识到它的起源与岛弧正常钙碱性岩浆 (水化地幔楔橄榄岩的部分熔融) 不同,而可能是来自于消减大洋岩石圈的直接熔融 (Kay, 1978; Defant and Drummond, 1990; Drummond and Defant, 1990; Defant *et al.*, 1991)。但是,消减板片在脱水之前直接发生熔融要求异常高的地温梯度 (Peacock *et al.*, 1994),而只有非常年轻的 ( $< 15\text{Ma}$ ) 热洋壳当消减至  $70 \sim 90\text{km}$  的深度时,才可能发生部分熔融产生埃达克质岩浆,此时的残留组合为含石榴子角闪岩和/或榴辉岩 (Kay, 1978;

Martin, 1987, 1999; Futa and Stern, 1988; Defant and Drummond, 1990; Defant *et al.*, 1991; Atherton and Petford, 1993; Kay *et al.*, 1993; Peacock *et al.*, 1994; Morris *et al.*, 1995; Sajona, 1995; Bourgois *et al.*, 1996; Maury *et al.*, 1996; Stern and Kilian, 1996)。

然而,在目前已发现的分布于环太平洋地区的新生代埃达克岩产地中,包括阿留申 (Kay, 1978; Myers and Frost, 1994)、厄瓜多尔 (Monzier *et al.*, 1997; Samaniego, 1997; Beate *et al.*, 2001; Chiaradia *et al.*, 2003)、巴拿马和哥斯达黎加 (Defant *et al.*, 1991, 1992)、墨西哥 (Cameron and Cameron, 1985; Gonzalez-Partida *et al.*, 2003)、Cascade (Defant and Drummond, 1993)、中安第斯 (Kay *et al.*, 1987, 1991, 1999, 2002; Kurtz *et al.*, 1997; Bissig *et al.*, 2000, 2003; Bourdon *et al.*, 2002a, 2002b; Reich *et al.*, 2003)、安第斯南端 (Martin, 1987; Futa and Stern, 1988; Kay *et al.*, 1993; Bourgois *et al.*, 1996; Stern and Kilian, 1996)、阿根廷 (Sasso and Clark, 1998)、堪察加半岛 (Kepezhinskis, 1989; Hongthaas *et al.*, 1995; Kepezhinskis *et al.*, 1995, 1996; Yagodinski *et al.*, 1995, 1998, 2001)、日本 (Morris, 1995; Shinjo, 1999)、菲律宾 (Defant *et al.*, 1988, 1991; Bellon and Rangin, 1991; Maury *et al.*, 1992; Sajona and Maury, 1998; 1996; Sajona *et al.*, 1993, 1994, 1996, 1997, 2000a, 2000b; Benard *et al.*, 1996; Benard *et al.*, 1996; Bellon and Yumul, 2000, 2001; Yumul *et al.*, 2002, 2003),除了少数例子被证实属于年轻 ( $< 15\text{Ma}$ ) 消减带的埃达克岩以外 (如智利南部 Austral Andes 的 Cook 岛和 Cerra Pampa、美国 St. Helens 山、巴拿马 El Valle),多数却发育在老 (冷) 的 ( $10 \sim 50\text{Ma}$ ) 消减带之上 (Peacock *et al.*, 1994; Martin, 1999; Castillo *et al.*, 1999; Beate *et al.*, 2001),这显然难于用热洋壳熔融模型 (不管是消减开始还是消减结束,或快速俯冲) 加以解释。对于中安第斯缓消减区和北安第斯地区的埃达克岩, Gutscher *et al.*, (1999) 提出了“冷板片缓慢消减地幔加热熔融”的解释模型,认为较老 ( $> 50\text{Ma}$ )、较冷的下降板片由于浮力作用,可在大约  $80\text{km}$  深度的楔状软流圈地幔中近水平消减并逐渐加热而发生熔融。Beate *et al.* (2001) 也认为该模型可以解释厄瓜多尔南部中新世-上新世的 Qiumsacacocha 火山的埃达克质岩浆的成因。Kay 及其同事们通过对世界最著名的缓消减区-中安第斯新生代岩浆活动的深入研究,认为“冷板片缓慢消减地幔加热熔融”模型存在致命的问题,进而提出“加厚陆壳底部 (新生基性下地壳) 部分熔融”模型,来解释缓消减区埃达克岩的成因 (Kay *et al.*, 1987; 1991, 1999; Kay and Gordillo, 1994; Kay and Abbruzzi, 1996; Kay and Mpodozis, 1999, 2001, 2002)。对于堪察加半岛北段与阿留申群岛交汇地区的冷板片消减区的埃达克岩成因, Yagodinski 及其同事们则结合这一地区的构造背景及其演化,提出“撕裂板块边缘熔融”模型 (Yagodinski *et al.*, 1995, 2001; Yagodinski and Kelemenn, 1998)。

由此可见,不管那一种埃达克岩成因解释,主要考虑以下几个重要因素:基性源岩(大洋岩石圈或基性下地壳)、较高的源区压力(1.2~4 GPa)、热源以及区域地球动力学背景。其中,热源和区域地球动力学背景是提供诱发源区熔融的机制,但不同地区其作用的方式可能会有重大差别,而且常常是一种解释和认识。只有源岩和源区压力才是决定埃达克岩地球化学特殊性的基本控制因素。不管是热洋壳还是冷洋壳的熔融,或者是加厚陆壳的基性下地壳熔融,只要源区压力使得源岩中大部分斜长石和一定量角闪石发生分解,石榴子石在残余固相中占有较大的比例(即含石榴石角闪岩、麻粒岩或榴辉岩相),形成的熔体就必然具有埃达克岩基本地球化学特征(Rapp *et al.*, 1991; Peacock *et al.*, 1994; Sen and Dunn, 1994, 1995; Rapp *et al.*, 1991, 1999, 2003; Prouteau *et al.*, 1999, 2001; Rapp and Watson, 1995; Rapp 1997)。也就是说,在不同的构造环境或地球动力学背景中,虽然其诱发熔融机制可能千差万别,但只要源区性质(源岩和体系压力)相似,部分熔融的熔体成分和残留固相组合必然是相似的。

对于埃达克岩来说:

(1) 如果起源于板片的中高压(1.2~4GPa)和中等程度(熔体分数为25~35%)部分熔融,生成的熔体必然是富钠、高铝、轻稀土富集、重稀土极度亏损、高铈、不发育明显的富铈异常的中酸性熔体,这已被各类天然玄武岩和角闪岩的熔融实验所证实(Sen and Dunn, 1994, 1995; Rapp *et al.*, 1991, 1999)。其中,富钠是源岩的特征,轻稀土的富集与其强不相容性有关,高铝、高铈和不发育富铈异常与大量斜长石分解进入熔体有关,重稀土和Y的极度亏损则与显著的石榴子石固相残留有关。而埃达克岩通常具有较高的过渡族元素(如Mg、Ni、Cr等)含量,据信是初始埃达克质熔体(pristine adakitic melts)(Rapp *et al.*, 1999)上升时与地幔楔橄榄岩的相互作用的结果(Kay, 1978; Defant and Drummond, 1990; Drummond and Defant, 1990; Martin, 1999)。Rapp *et al.* (1999)近期的相关高压(3.8GPa)实验,也强有力地证实了埃达克质熔体与地幔楔橄榄岩的交代反应,可以显著影响残余埃达克质岩浆(evolved adakitic melts)中相容元素的含量(Mg<sup>#</sup>增大,过渡族元素含量变高),但不相容元素的含量及其比值则无明显变化。

(2) 如果纯粹是基性下地壳的中高压部分熔融生成的埃达克岩浆,其地球化学特点应与相应的初始板片熔体(pristine adakitic melt)及基性岩的高压实验熔体更为接近。

(3) 如果是板片熔体交代地幔生成的基性岩底侵至加厚陆壳底部,在经历高压分离结晶、或MASH过程、或冷却后重熔,最终上升至中上地壳的埃达克岩浆(Kay *et al.*, 1987, 1991, 1999, 2002; Petford and Atherton, 1996; Petford *et al.*, 1996; Petford and Gallagher, 2001),那末,这种岩浆的地球化学与同位素组成就会表现出更大的变化,但仍会保持埃达克岩的基本地球化学特点。事实上,目前环太平洋地区所见

到的新生代被称为埃达克岩或埃达克质岩石(adakite-like)中,虽然总体地球化学特征基本一致,但不同地区仍存在一些差异,这种差异除了体现在部分微量元素方面,也体现在Sr-Nd-Pb同位素组成上。这些差异产生的主要原因可能在于源岩、地幔混染程度以及源区条件的不同。

因此,我们认为,埃达克岩的地球化学特点是其定义的根本所在,而其形成构造环境或动力学背景却是诱发熔融的条件或机制,而且往往是解释与认识。二者不能混为一谈,后者也不应当作为其定义的一部分。

## 2.2 埃达克岩家族(adakite clan)

板片部分熔融生成的初始埃达克质熔体,在上升至地表过程中需穿越楔状地幔,它必然与地幔橄榄岩发生隐性或显性物质交换与相互作用,这种相互作用不仅会改变残余熔体的成分(如MgO、Mg<sup>#</sup>、Cr、Ni、Co含量增高)使其成为我们今天所见的埃达克岩浆,也将改造了穿越区域的地幔橄榄岩的成分(如高场强元素丰度增大),使其成为埃达克熔体交代的地幔。如果二者交代程度较高,残余熔体就会表现出比一般埃达克岩更为强烈的富镁特征,这种成因的安山岩常常含有斜方辉石斑晶或橄榄石斑晶,被称为镁质安山岩(Magnesian Andesite, MA)或高镁安山岩(High Magnesian Andesite, HMA),如日本弧所见到的方辉安山岩及玻基方辉安山岩就属于此类岩石(Shinjo, 1999)。与此同时,如果这种被熔体交代的地幔橄榄岩发生部分熔融,生成的岛弧钙碱性岩浆必然继承某些被熔体交代特征,如高场强元素较为富集(Crawford *et al.*, 1987; Klein *et al.*, 1997),如富钕玄武岩(Niobium-enriched basalt, NEB)。Sajona *et al.* (1998)将埃达克岩及介于埃达克岩与岛弧正常钙碱性火山岩之间的重要过渡类型,通称为埃达克岩家族("the adakite clan")。

(1) 高镁安山岩(HMA): Yagodinski *et al.* (1995)阿留申群岛的中新世-晚更新世岛弧火山岩中鉴别出两种类型的HMA,分别被称为埃达克型高镁安山岩(Adak-type HMA)和皮波型高镁安山岩(Piip-type HMA)。埃达克型高镁安山岩含有早期结晶的单斜辉石斑晶,但无橄榄石斑晶,岩石具有高的La/Yb比值及异常高的Sr含量,但HFSE丰度相当低,其Sr-Nd同位素组成与MORB相似。这些地球化学特征与埃达克岩十分相似,但其Mg<sup>#</sup>、MgO、Cr、Ni的含量却明显比常见的埃达克岩(Defant and Drummond, 1990)高的多。Yagodinski *et al.* (1995)认为,埃达克型高镁安山岩是初始板片熔体受到地幔楔橄榄岩较强烈的混染与同化作用而形成残余埃达克熔体(Kay, 1978; Kelemen *et al.*, 1993; Sen and Dunn, 1994; Kelemen, 1995),混染过程可能卷入了橄榄石的分解及斜方辉石或斜方辉石+石榴子石的结晶(Polat and Kerrich, 2001)。与埃达克型高镁安山岩相比,皮波型高镁安山岩含有早期结晶的橄榄石斑晶,总体上具有更高的Mg<sup>#</sup>、MgO、Cr、Ni、Co含量,而K和LILE却含量较低,尤其是La/Yb比值Sr的含量比埃达克型低得多,根据这些特征,推测这种

HMA 更有可能是起源于板片熔体交代的地幔橄榄岩的部分熔融产物 (Polat and Kerrich, 2001)。皮波型 HMA 还可能是受地幔楔混染的残余埃达克质熔体与正常岛弧玄武岩的混合产物 (Yogodzinski and Kelemen, 1998)。总之, 对于这两种类型的 HMA, 板片组分对其岩浆形成的贡献应具有明显的差别 (Kelemenn, 1995; Rapp *et al.*, 1999; Polat and Kerrich, 2001)。

(2) 富铌玄武岩 (NEB): 一般将 Nb 含量大于  $20\mu\text{g/g}$  的玄武岩称富 Nb 玄武岩, 含量介于  $6\sim 20$  的称富 Nb 玄武岩 (Polat and Kerrich, 2001), 而此值 ( $6\sim 20\mu\text{g/g}$ ) 也高于岛弧玄武岩的 Nb 含量 ( $\sim 2\mu\text{g/g}$ ) (Sajona *et al.*, 1996; Taylor and Nesbitt, 1998)。NEB 与 E-MORB 型拉斑玄武岩的区别, 在于其轻重稀土显著分馏, 高 Nb、Ti 及相对较低的 Y, 另外还有较高的 Nb/Ta、Zr/Hf 比值和较低的 Zr/Sm 比值。NEB 与岛弧玄武岩相比, 它具有较高的  $\text{TiO}_2$  含量 (1%) 低的 LREE/HFSE 比值 ( $\text{La/Nb}_{\text{mantle}} = 0.7\sim 2.0$ ) (Polat and Kerrich, 2001)。NEB 的不相容元素的地幔或球粒陨石标准化蛛网图经常显示出非常弱的负 Nb 异常, 甚至出现正 Nb 异常这与岛弧火山岩 ( $\text{La/Nb}_{\text{mantle}} > 0.7\sim 2.0$ ) (的显著负 Nb 异常呈强烈对照 (Sajona *et al.*, 1996)。NEB 可与埃达克岩浆近同时出现在同一火山喷发中心, 如巴拿马、哥斯达黎加和 Cascade 所见到的那样 (Defant *et al.*, 1991, 1992), 或者在埃达克岩浆喷发后侵位, 如菲律宾 Zamboanga 火山 (Sajona *et al.*, 1996; Maury, 1998)。因此, 根据 NEB 与埃达克岩的密切共生关系 (Defant *et al.*, 1991; Defant and Drummond, 1993; Maury *et al.*, 1996) 及其地球化学特征, 推测可能是楔状地幔部分熔融的产物, 而这种产生 NEB 的地幔橄榄岩受到了稍前时期板片熔体的交代 (Sajona *et al.*, 1993, 1996; Kepezhinskis *et al.*, 1995, 1996)。

因此, 埃达克岩家族成员 (埃达克岩、HMA 和 NEB) 之间的成因联系可以理解为: 埃达克岩为轻微地幔混染的板片熔体, HMA 是受到楔状地幔明显混染的板片熔体, 而 NEB 则是被板片熔体交代的地幔发生部分熔融的产物 (Polat and Kerrich, 2001)。我们认为, 对于所有与板片熔体有关的岩石 (包括埃达克岩、HMA、MA、NEB 等), 都或多或少显示出 (地幔楔) 软流圈地幔的某些地球化学印记, 这是因为板片熔体从源区抽取后向地表 (火山喷发) 或上地壳 (侵入) 的侵位过程中必然通过楔状源流圈地幔, 二者必然发生相互作用而引起各自成分的某种变化。即使是狭义的埃达克岩, 也有一定程度地幔混染的地球化学印记 (如相容元素含量增高); 皮波型 HMA 也可能是被板片熔体的交代地幔的部分熔融产物 (源区与 NEB 相似); NEB 由于其低硅性质、含有橄榄石斑晶和高场强元素富集, 无疑来自于被埃达克熔体交代的地幔。这又与正常岛弧玄武岩的源区 (流体交代的地幔) 有一定的交集。可见, 初始板片熔体 (纯埃达克岩, Rapp *et al.*, 1999)、被地幔轻微混染的板片熔体 (埃达克岩)、被地幔显著混染的板片熔体 (埃达克型 HMA)、被熔体交代地幔的熔体

(皮波型 HMA、NEB) 以及正常岛弧钙碱性岩浆 (如岛弧玄武岩 IAB) 之间, 必然会有一些过渡色彩的岩石存在, 而这种过渡关系的本质应归因于消减大洋岩石圈的部分熔融事件。

### 3 埃达克岩的源区性质与非板片成因的埃达克岩浆

#### 3.1 埃达克岩的源区性质的基本约束

以上对埃达克岩及其相关岩石的讨论, 均基于消减洋壳熔融这一主要地质事件及其诱发的相关事件 (埃达克熔体交代地幔)。近年来人们认识到, 板片熔融模型及板片熔体难以解释一些与消减事件无关或关系不大的、却也具有埃达克岩主要鉴别特征的 (富铝、高铌、极度亏损重稀土、无明显富铕异常等) 中酸性火山岩和侵入岩。例如秘鲁西北部著名的中新世 Cordillera Blanca 岩基 (Cobbing *et al.*, 1981; Atherton & Sanderson, 1985, 1987; Petford & Atherton, 1992, 1996; Petford and Gallagher, 2001); 加拿大的 Coastal Range 岩基 (Atherton & Sanderson, 1985; Hess, 1989)、美国的 Idaho 岩基 (Norman *et al.*, 1992)、Sierra Nevada 岩基 (Bateman, 1992)、Peninsular Range 岩基 (Hess, 1989)、北俄勒冈 Cornucopia 岩体 (Johnson *et al.*, 1997)、北美阿巴拉契亚造山带 Rockford Granite, Bifur Springs, Almond, Blacks Ferry, Hog Mountain, Camphill 和 CCG 等岩体 (Drummond *et al.*, 1997); 南美西部安第斯山内侧秘鲁著名的 Cordillera Blanca 岩基; 法国中央地块晚古生代 Velay 花岗质杂岩体 (Williamson *et al.*, 1992), 以及中国东部晚中生代的一些花岗质岩石 (张旗等, 2001a, 2001b, 2001c; 王焰等, 2001; 刘红涛等 2002a, 2001b) 等等。这些岩浆是如何起源的? 源区性质如何? 我们能够从这些岩石获得怎样的深部过程信息? 板片熔融模型可以为后者的成因解释提供什么启示? 这需要首先分析板片熔融模型究竟能告诉我们什么。虽然板片熔融模型对解释 B-型消减地区一部分埃达克岩及其相关岩石的成因上取得了一定的成功 (但仍有较多的争论, 如 Castillo *et al.*, 1999; Bellon and Yumul, 2001), 但该模型解释直到最近仍将板片熔融事件的发生, 限制在消减初期 (Initiation of subduction) 或消减末期 (End of subduction) 这两个主要特定的消减时段。之所以如此限定, 是因为只有在这两个时段里, 洋壳还比较年轻因而没有完全被冷却, 当俯冲到  $70\sim 90\text{ km}$  的深度时不至于大规模脱水, 而是在消减带地温梯度下就达到其湿固相线温度而发生部分熔融 (Kay, 1978; Defant and Drummond, 1990; Drummond and Defant, 1990; Atherton and Petford, 1993; Defant *et al.*, 1994; Peacock *et al.*, 1994; Morris, 1995; Sajona, 1995; Drummond *et al.*, 1996; Sajona *et al.*, 1996; Stern and Kilian, 1996)。从实验岩石学 (Carroll and Wyllie, 1989; Johnston and Wyllie, 1989; Rapp *et al.*, 1991, 1999; Green, 1992; Sen and Dunn, 1992; Keppler H, 1996; Patino Douce, 2000) 和相关模拟计算 (Peacock, 1990, 1993;

Peacock *et al.*, 1994) 结果来看, 尽管不同研究者提出的可发生熔融洋壳的最大年龄不尽相同 (5 ~ 20 Ma), 但大家的共识是, 只有年轻的热洋壳才可能发生部分熔融, 这是热力学和正常消减带地温梯度的共同约束使然 (Martin, 1999)。然而, 就目前已发现的新生代埃达克岩的产地中, 的确有相当一部分已证实其消减洋壳的年龄大于 30 Ma 甚至更老 (Beate *et al.*, 2001)。Gutscher *et al.* (2000) 研究中安第斯北段埃达克岩及其区域构造背景后, 提出了“缓消减板片地幔加热熔融”模型以解释这一地区埃达克岩的成因, 认为年龄较老的 (> 30 Ma) 板片在缓俯冲过程中 (在 70 ~ 90 km 深度) 被软流圈地幔加热后可能发生熔融。Yogodzinski *et al.* (2001) 针对堪察加北部的埃达克岩提出了“撕裂板块边缘的冷板片熔融”模型, 认为太平洋板块向北西方向消减时, 在阿留申与堪察加岛弧近直交的部位发生撕裂导致软流圈地幔上涌, 进而熔化了板片的边缘而产生埃达克岩浆。另外, 很早就有人提出过快速消减引起的剪切热可能诱发板片上部的部分熔融的设想 (Honda, 1985; Molnar and England, 1990)。

总之, 上述种种对埃达克岩浆的成因解释, 本质上都是在试图寻找一种与所在区域构造背景相适应的、足以诱发板片直接熔融的热源, 以及产生这种热源的地球动力学机制而已。但是, 决定熔体性质和成分的直接因素却是源区的性质 (源岩、温度和压力)。因此, 在不同构造背景下产生相似成分的岩浆, 首先指示这些岩浆具有近似的源区性质; 至于导致源区相似的原因, 就需要具体地域具体分析。对于埃达克质岩浆产生, 其源区性质一般认为是基性 (或镁铁质) 源岩在中高压条件下的部分熔融 (事实并非完全如此, 见下文)。只要满足上述对源区性质的基本约束, 理论上在任何地球动力学环境都可以产生埃达克质岩浆。

### 3.2 非板片熔融成因的埃达克质岩浆

位于秘鲁西北部高安第斯带著名的 Cordillera Blanca 岩基是强烈加厚陆壳背景下中新世-上新世侵位的、由淡色花岗岩闪长岩和花岗闪长岩组成的大型复式岩 (Cobbing *et al.*, 1981; Atherton and Sanderson, 1985, 1987; Atherton and Petford, 1993; Petford and Atherton, 1992, 1996; Petford *et al.*, 1996; Petford and Gallagher, 2001)。该岩基的淡色花岗岩闪长岩具有富钠 ( $\text{Na}_2\text{O} > 4\%$ )、高铝 ( $\text{Al}_2\text{O}_3 > 15\%$ )、高锶 ( $\text{Sr} > 300 \mu\text{g/g}$ )、轻重稀土强烈分馏 ( $\text{La/Yb}_{\text{cn}} > 20$ )、极度亏损重稀土 ( $\text{Yb} \sim 0.36 \mu\text{g/g}$ ) 以及无明显富铕异常等地球化学特征。除其相容元素 (Cr、Ni 等) 的含量较低以外, 上述成分特征均与埃达克岩的具有良好的可比性, 但该岩基发育的构造位置排除了板片熔融成因的可能性 (Petford and Atherton, 1996)。Petford 和 Atherton (1996) 认为, 这种富钠的中酸性花岗岩质岩石是在强烈加厚陆壳及总体伸展背景下, 由新近底侵至下地壳的幔源基性岩石 (玄武岩) 在高压下 ( $> 1.5 \sim 2.0 \text{ GPa}$ ) 部分熔融的产物, 而区域伸展背景下加厚下地壳的拆

沉-底侵事件可能是诱发基性下地壳熔融的主要深部原因 (Kay and Kay, 1991, 1993)。这一认识与 Kay 及其同事们对智利中部新生代缓消减区埃达克岩浆的成因解释十分接近 (Kay *et al.*, 1991, 1999; Kay and Gordillo, 1994; Kay and Abbruzzi, 1996; Kay and Mpodozis, 2001, 2002)。

近年来人们在中国东部陆续识别出大量地球化学性质类似于埃达克岩或 Cordillera Blanca 岩基的、晚中生代中酸性火山岩和侵入岩 (张旗等, 2001a, 2001b, 2001c; 王强等, 2000, 2001; 许继峰等, 2001; 王焰等, 2001; 刘红涛等, 2002a, 2002b; 蔡剑辉等, 2003; 杨进辉等, 2003)。然而, 对于中国东部中生代的构造环境, 到目前为止还没有在该地区及东亚找到中生代早中期古太平洋板块向欧亚板块东缘曾发生过俯冲的直接构造证据 (邵济安等, 2001)。中生代晚期 (约 110 Ma 以后) 启动的 B-型俯冲作用相对于中国东部, 却是北向的或北北东向的 (吴福元等, 1999a), 而此时该区域岩石圈已处于强烈的北西-南东向的伸展和北北东向的左行走滑活动。因此, 这一地区中生代大规模岩浆活动 (包括本文所述埃达克岩) 与所谓的古太平洋消减事件之间并不无直接联系, 而是与区域伸展、岩石圈与下地壳减薄等板内过程有关 (邓晋福等, 1994, 1996; 吴福元等, 1999a, 1999b; 邵济安等, 2001; 张旗等, 2001a, 2001b; 霍明国等, 2002)。根据埃达克岩浆地球化学对其源区性质的基本约束, 结合中国东部中生代所处的构造环境, 本地区晚中生代埃达克岩估计应来自加厚下地壳岩石的部分熔融, 而诱发其熔融的原因可能是区域伸展过程中下地壳和岩石圈的拆沉与地幔岩浆底侵事件 (张旗等, 2001a, 2001b, 2001c; 刘红涛等 2002a, 2002b)。

## 4 埃达克岩与斑岩铜矿-浅成热液金矿的共生关系

这里所说的斑岩铜矿-浅成热液金矿, 指岩浆晚期热液有关的浅成和超浅成 Cu-Mo-Au-Ag 矿化系列, 因而也包括诸如斑岩 Cu-Au 矿床、斑岩 Cu-Mo 矿床、斑岩 Mo 矿和斑岩 Au 矿等矿化类型。目前世界上约 50% 金属铜 70% 以上金属钼的产量分别来自于斑岩 Cu、Mo 矿化系统, 而浅成热液金矿也是世界黄金产量的主要贡献者之一。因此, 其研究意义显而易见。以往人们对斑岩 Cu-Mo-Au 系统和浅成热液 Au-Ag 系统已经作了大量矿床学研究, 对它们的地质产状、矿化样式、物质成分、蚀变作用、流体性质、成矿物理化学条件和构造背景等特征均有相当深入的了解 (Sillitoe, 1972, 1973, 1977, 1988; Hollister 1974; Hunt, 1991; White, 1991; Hemley, 1992; White and Hedenquist, 1995; Mitchell and Leach, 1999 等)。这些研究绝大多数主要针对矿化系统本身的特征, 而对矿化与成矿母岩浆的关系研究虽有涉及但不够深入, 但是人们也已经注意到, 大多数斑岩铜矿与花岗闪长岩或富碱侵入体有关, 而且也认识到含矿斑岩 (ore-

bearing) 和无矿 (barren) 斑岩之间存在明显的差别 (Baldwin and Pearce 1982; Clark, 1993), 并试图借助详细的岩石结构和铂族元素地球化学的对比研究, 来解释造成矿质富集的内在机制和原因 (Hedenquist and Lowenstern, 1994; Hedenquist and Richards, 1998)。发现埃达克岩及其相关岩石与斑岩铜矿-浅成热液金矿之间存在密切的时空共生关系 (Thieblemont *et al.*, 1997; Sajona and Maury, 1998; Rabbia *et al.*, 2000; Oyarzun *et al.*, 2001; Bissig *et al.*, 2003; Coira *et al.*, 1993; Gonzalez-Partida *et al.*, 2003; Reich *et al.*, 2003) 是近年来国际上相关研究的一个重要进展, 这主要体现在以下几个方面。

#### 4.1 从统计数据看埃达克岩与 Cu-Au 矿化的关系

Thieblemont *et al.* (1997) 对世界上 43 个斑岩铜矿床和浅成热液金矿床 (矿区) 的有关岩浆岩进行了全岩地球化学数据的整理研究, 以判断埃达克岩与这些矿化系统的关系。被统计的矿床主要来自于环太平洋地区新生代形成的岩浆-矿化系统, 包括了这一地区几乎所有世界级的巨型和超大型矿床, 因而其研究结论具有典型的代表性意义。在统计的 43 个矿床实例中, 有 38 个与埃达克岩浆作用有关, 其相关性大致有两种情形: 1) 埃达克岩容矿 (adakite-hosted mineralization), 主要表现在斑岩铜矿, 如中安第斯地区的一些大型和超大型斑岩铜矿 (Chuquicamata, El Salvador, Disputada, Quebrada Blanca, El Bra, La Escondida, Potrerillos, Los Brones, El Teniente, Peiambres 等); 2) 矿化作用与埃达克岩浆活动之间具有时空联系 (space and time adakite-related mineralization), 主要表现在浅成热液 Au-Ag 矿床, 如 Panguna, Kori Conga 等金矿床 (Thieblemont *et al.*, 1997; Kay *et al.*, 1999; Reich *et al.*, 2003)。尽管上述统计没有包含全球所有的相关矿床, 甚至相差甚远, 尤其是那些产在其他巨型成矿域 (如古亚洲洋成矿域的中亚地区和特提斯成矿域的土耳其、伊朗地区等) 的斑岩铜矿, 但是, 这一统计结果已经显示出埃达克岩对 Cu-Au 矿化作用明确倾向性。Thieblemont *et al.* (1997) 并据此得出以下几个推论:

(1) 在全球尺度上, 埃达克岩浆发育区, 也是斑岩铜矿和/或浅成热液金矿的矿化集中区 (如美国西部、中安第斯、菲律宾群岛和巴布亚新几内亚等)。

(2) 地区尺度上, 许多重要的斑岩型和浅成热液性矿床与埃达克岩具有共生关系, 而且埃达克岩常常就是容矿岩。

(3) 矿床尺度上, 如果既有埃达克岩又有 (同期) 非埃达克岩时, 矿化则更倾向发育在埃达克岩中。尽管如此, 并非所有的埃达克岩都与 Cu, Au 矿化有关, 这需要对矿化埃达克岩与非矿化埃达克岩进行深入的对比研究。

#### 4.2 智利北部两个相邻斑岩铜矿带的强烈对比-埃达克岩联系

伴随智利北部 (20° ~ 27°S) 新生代弧岩浆活动, 形成了

在成矿规模上强烈对比的两个平行的 Cu-Au 矿带。这种对比性被归因于母岩浆性质得到不同 (Oyarzun *et al.*, 2001)。西矿带距智利海沟较近, 是一条古新世-早始新世正常钙碱性岩浆带, 以发育火山岩为主, 伴有小规模深成侵入活动, 与之伴生的矿化作用形成一些规模较小的斑岩铜矿 (如 Mocha, Cerro Colorado, Spence, Sierra Gorda, Lamos Bayas) 和浅成热液金矿床 (Faride, Cachinales, Guanaco)。东矿带距智利海沟较远, 是一条晚始新世-早渐新世埃达克质岩浆带, 全部为岩浆侵入活动, 缺乏火山岩, 与之伴生的矿化作用形成了若干世界级的巨型、超大型和大型斑岩铜矿床 (如 Chuquicamata, La Escondida, El Salvador, Quebrada Blanca, El Bra, Potrerillos 等) (Sillitoe 1988; Cornejo *et al.*, 1997; Vila and Sillitoe, 1991; Camus and Dilles, 2001; Richards *et al.*, 1999, 2001)。西矿带的古新世-早始新世火山岩为正常钙碱性的玄武岩-安山岩-流纹岩组合。晚始新世早期的 Incaic 挤压事件之后, 弧岩浆前峰东移至东矿带的位置, 发生晚始新世-早渐新世的埃达克质岩浆侵入活动 (Davidson and Mpodozis, 1991)。Oyarzun *et al.* (2001) 认为, 这种岩浆性质与侵位方式的时空演变可能与区域消减环境和应力状态的变化有关:

(1) 古新世-早始新世是在相对张性的环境下正常消减引起地幔楔的部分熔融, 形成了正常钙碱性岩浆的喷发与小规模侵入。由于强烈的火山喷发 (因而可将整个岩浆系统视为“开放系统”), 大规模火山脱气使硫和挥发分等重要成矿剂从岩浆中逃逸, 因而不利于形成较大规模的矿化作用。

(2) 与之相反, 在晚始新世-早渐新世时期, 消减带转变为斜向、缓角度的快速俯冲 (Kay *et al.*, 1999; Davidson and Mpodozis, 1991; James and Sacks, 1999), 消减板片的部分熔融生成埃达克岩浆, 在这种相对挤压的环境下侵入上地壳, 因而保持一个相对封闭的岩浆系统 (阻止 SO<sub>2</sub> 逃逸), 因而有利于大规模矿化。

我们认为上述解释并没有从本质上阐明板片熔体 (埃达克岩) 为何倾向于诱发大规模 Cu-Au 矿化的原因, 而“火山脱气导致挥发分逃逸因而不利于成矿”早已是人们对于岩浆有关矿化的基本认识 (Rabbia *et al.*, 2002; Richards *et al.*, 2002)。尽管如此, Oyarzun 及其同事毕竟描述了一个重要事实: 在智利北部的中安第斯地区发育两条平行的、形成时代有先后顺序的 Cu-Au 矿带, 它们的形成与消减诱发的弧岩浆有关 (Sillitoe, 1988a, 1988b); 其中由巨型、超大型和大型斑岩铜矿床构成的矿带与埃达克岩有密切的时空共生关系, 另一条由规模较小的浅成热液金矿床/斑岩铜矿床构成的矿带则与正常钙碱性岩浆有关。

#### 4.3 缓消减带之上斑岩铜矿-浅成热液金矿化-埃达克岩联系

智利中部 27° ~ 34°S 这段中安第斯山脉是目前世界上已发现的规模最大的缓消减带发育地区。研究表明, 自中新

世以来, Nazca 洋壳板块在该段一直以缓倾角 ( $<30^\circ$ ) 向南美大陆消减, 这种不同寻常的缓消减过程引起大规模地壳缩短加厚, 岩石圈均衡调整诱发区域隆升, 进而形成了仅次于我国青藏的第二高原区 - Puna Altiplano 高原 (Kay *et al.*, 1987, 1991, 1994, 1999; Stern, 1991; Kay and Abbruzzi, 1996; Kay and Gordillo, Kay and Mpodozis, 1999, 2002)。它的南北两侧分别为近代火山构成的安第斯南火山岩带 (SVZ) 和北火山岩带 (NVZ), 自身则不发育晚近时期 ( $<5\text{Ma}$ ) 的火山活动。虽然该地区与前述智利北部从中新世以来发生明显的区域性构造分异, 但新生代的 Cu、Au 矿化却毫不逊色, 在该地区已发现了 El Teniente (Rabbia *et al.*, 2000), Los Pelambres (Sillitoe, 1973; Reich *et al.*, 2003), Rio Blanco-Los Brones (Tosdal, 1995; Serrano *et al.*, 1996; Kay *et al.*, 1999) 及 El Indio-Pascua (Bissig *et al.*, 2003) 等世界级巨型和超大型斑岩铜矿和浅成热液金矿床, 而这些著名的斑岩铜矿和浅成热液金矿都与中新世或上新世埃达克岩有关 (Kay *et al.*, 1999; Kay and Mpodozis, 2001, 2001; Bissig *et al.*, 2003; Reich *et al.*, 2003)。为了更深入地了解矿化与埃达克岩事件的关系, 需简要了解本地区中新世以来发生的主要地质事件序列。

根据区域构造、地球物理和地质年代学资料的约束 (Isacks, 1988), Nazca 板块在这段安第斯的板片是从  $\sim 26\text{Ma}$  才开始变缓的。而在中新世的早期 ( $27 \sim 20\text{Ma}$ ) 的消减角与相邻南火山带 ( $35^\circ\text{S}$ ) 目前的正常消减角相似, 这段时期的地壳厚度为  $35 \sim 40\text{km}$  (Kay *et al.*, 1991; Kay and Abbruzzi, 1996; Kay and Mpodozis, 2002), 在中新世的中晚期 ( $20 \sim 5\text{Ma}$ ), 板片的消减角持续变小, 并伴随地壳加厚、地幔楔显著减薄、火山前锋东移和弧岩浆带变宽, 并在中新世末 ( $5\text{Ma}$ ) 弧岩浆活动消失。在  $20 \sim 5\text{Ma}$  期间, 中安第斯缓消减带之上从北到南的地壳厚度并不相同, 北部 ( $28 \sim 29^\circ\text{S}$ ) 和中部 ( $30 \sim 31^\circ\text{S}$ ) 到中新世末达到  $55\text{km}$ , 南部 ( $31 \sim 33^\circ\text{S}$ ) 的地壳厚度正常 ( $30 \sim 35\text{km}$ ) (Kay *et al.*, 1995)。在  $33^\circ\text{S}$  以南, 中新世岩浆带之下的地壳厚度从未超过  $40\text{km}$ , 但当弧岩浆活动在上新世东移至今天的高安第斯后, 此处现在的地壳加厚到  $55\text{km}$ 。

对中新世以来中安第斯缓消减带之上发生的岩浆活动及相伴的大规模 Cu-Au 成矿作用, 一般认为是板片逐渐变缓的深部构造过程作为一级制约而诱发的一系列相互关联的地质后果 (Isacks, 1988; Skewes and Stern, 1994, 1997; Kay *et al.*, 1999; Kay and Mpodozis, 2001, 2002)。Kay and Mpodozis (2001) 在总结区域地质演化认识 (Isacks, 1988) 基础上, 根据来自本地区 El Indio, Maricunga-Farallon Negro 和 El Teniente 三个区域 500 多个成矿前、成矿期和成矿后火成岩样品的全岩地球化学数据研究, 重点考虑岩浆演化与大规模 Cu、Au 矿化的耦合关系, 对不同阶段岩浆的源区性质的明显变化进行了系统评估, 进而提出源区性质对成矿作用的精细制约。他们认为, 上述三阶段岩浆均显示较高的 K、Ba、

Th、Ta、轻稀土含量, 这与正常的弧岩浆化学并无二致, 关键是中、重稀土元素含量及其比值的明显系统变化具有重要的源区变迁意义。从成矿前、成矿期到成矿后, 岩浆的 Sm/Yb 比值依次逐渐增大, 反映出与不断演化岩浆相平衡的残留固相组合中, 随源区压力逐渐增高而发生的单斜辉石  $\rightarrow$  角闪石  $\rightarrow$  石榴子石的改变 (Kay and Kay, 1991)。下面以缓俯冲板片区中部 El Indio 地区为例来说明板片变缓过程与岩浆性质/矿化的关系。该地区中新世以来的各阶段的岩浆在地理分布和成分上均有变化, 岩浆活动强度从早到晚总体上呈现持续减弱的趋势, 地壳构造应变峰期一般为各岩浆阶段的天然界线 (Kay *et al.*, 1991, 1999)。

(1)  $27 \sim 20\text{Ma}$ : 为正常的钙碱性弧岩浆活动为特征 (玄武岩-安山岩-流纹岩组合), 反映正常的消减状态和地壳厚度条件下的地幔楔衍生岩浆的地球化学特点 ( $\text{Sm/Yb} = 1 \sim 3$ ), 这个阶段基本无矿化显示。

(2)  $17 \sim 10\text{Ma}$ : 为埃达克质岩浆活动 (含角闪石的安山岩和英安岩组合) (Martin *et al.*, 1997), 其 REE 图谱反映源区残留固相的镁铁质矿物从角闪石向含有石榴子石的转变 ( $\text{Sm/Yb} = 3 \sim 5$ ); 该期岩浆活动结束与 Precordillera 逆冲构造事件峰期 ( $11 \sim 9\text{Ma}$ ) 和 El Indio 地区的主矿化期 ( $10 \sim 6.5\text{Ma}$ ) 的开始相重叠 (Clavero *et al.*, 1997; Bissig *et al.*, 2001)。

(3)  $7 \sim 6\text{Ma}$ : 为本地区新生代岩浆活动的结束期, 以发育少量埃达克质岩浆 (含角闪石英安岩) 为特点, 重稀土更为亏损 ( $\text{Sm/Yb} = 5.5 \sim 9.5$ ), 反映其残留固相以富含石榴子石 (+ 角闪石) 为特征, 此时的地壳厚度应超过  $55\text{km}$ , 而且矿化作用早已结束。上述资料表明, 中安第斯缓消减区持续加厚陆壳之上大规模 Cu-Au 矿化的形成, 发生在消减板片变化过程中两个不同性质岩浆阶段的转换时期。在接近矿化期及矿化发生过程中 (矿化期) 侵位的岩浆, 其源区残留固相以富含角闪石为特征, 并逐渐向富含石榴子石残留组合的方向转变, 指示地壳厚度的渐进加厚导致岩浆源区性质的渐变。将消减带变缓过程与岩浆/矿化事件相联系十分重要, 这是由于正在脱水消减板片消减角逐渐变缓, 使得其上的楔状地幔变冷而缺乏流动性, 限制了地幔楔的部分熔融规模和流体移出 (Kay and Mpodozis, 2001)。从这种地幔产生的基性熔体底侵于加厚陆壳的底部, 必然使下地壳越来越富水。由新生的下地壳富水基性岩石在高压下 ( $1.5 \sim 2.5\text{GPa}$ ) 熔融产生的埃达克岩成为潜在的富流体成矿母岩。从正常消减时地幔楔熔融形成的正常钙碱性弧岩浆, 到板片变缓陆壳加厚时水化基性下地壳的部分熔融形成富水的中酸性埃达克质岩浆, 这之间可能经历岩浆源区从量变到质变的逐渐置换过程。Kay and Mpodozis (2001) 认为, 并非所有具埃达克特点的岩浆都会发生矿化, 正如 El Indio 地区所表现的那样, 大规模矿化开始 ( $\sim 10\text{Ma}$ ) 之前约  $6 \sim 8\text{Ma}$  的时期里也是埃达克岩侵位 (角闪石发生分解, 岩浆的 Sm/Yb 比值一般低于 5 但高于 2.5), 但没有明显矿化的记录; 而该地区最后



阶段(7~5 Ma)的埃达克岩浆(以石榴石为主导的“干的”残留固相组合,一般岩浆 Sm/Yb 比值 >7),也无明显矿化。大规模矿化仅发生在 10~8Ma 这段特殊时期。因此根据重稀土比值的变化推测,只有当残留固相组合中镁铁质矿物从角闪石向石榴石大规模转变的这段时期所形成的埃达克岩浆,才与大规模矿化相联系(Kay and Mpodozis, 2001);因为这个时期会有大量的源区角闪石分解,使生成的岩浆富含成矿所需要的大量挥发份和水流体,有利于岩浆中成矿物质(Cu、Au、Mo、Ag 等)的循环和萃取。由此看来,Sm/Yb 比值是反映源区性质转换的一个非常灵敏的“指示剂”,不仅可以有效地示踪源区性质,而且还指明特殊地球化学区间(Sm/Yb = 5~7)的埃达克岩才有利于成矿。一般认为弧岩浆(包括正常钙碱性岩浆和埃达克岩浆,不管是板片熔体,地幔楔熔体抑或下地壳熔体)在最终侵位到高位岩浆房之前会经历下地壳的 MASH (Mixing-Assimilation-Storage-Homogenization) 过程(Hildreth and Moorbath, 1988; Atherton and Sanderson, 1985, 1987; Atherton and Petford, 1993; Petford and Atherton, 1992, 1996; Petford *et al.*, 1996; Petford and Gallagher, 2001; Feeley, 1993; Hawkesworth and Clarke, 1994; Kay and Mpodozis, 2001, 2002)。如果这种过程成立,那么下地壳就像一个“压力过滤器”,正常地壳厚度条件下 MASH 过程的岩浆会呈现低压源区的地球化学色彩,加厚地壳条件下的 MASH 过程的岩浆则会显示高压源区的地球化学印记。

上述对中安第斯缘消减区埃达克岩浆的成因认识,既不同于“年轻热洋壳熔融”(Kay, 1978; Defant and Drummond, 1990; Drummond and Defant, 1990),也不同于“缓消减冷洋壳地幔加热熔融”(Gutscher *et al.*, 1999; Beate *et al.*, 2001),而是基于详细的年代学与岩浆地球化学资料,结合区域地质演化和重要构造事件的耦合关系而提出的。这种在加厚陆壳条件下新生的水化基性下地壳(hydrous mafic underplating)的部分熔融机制,与秘鲁北部高安第斯地区 Cordillera Blanca 岩基的富钠花岗质岩石的成因相似(Atherton and Petford, 1993; Petford and Atherton, 1992, 1996; Petford *et al.*, 1996; Petford and Gallagher, 2001)。尤其是依据稀土元素比值示踪岩浆源区性质并厘定含矿埃达克岩与无矿埃达克岩判别标准,值得高度重视。

#### 4.4 菲律宾: 复杂岛弧区 Au、Cu 矿化-埃达克岩联系

菲律宾群岛是一个相当复杂的新生代洋内岛弧地体(Gervasio, 1971; Cardwell *et al.*, 1980)。它不仅发育欧亚大陆色彩的变质基底,而且四周被新生代俯冲带所包围(Rangin *et al.*, 1990)。西侧,中新世南中国海盆沿马尼拉海沟向东消减;东侧,古新世菲律宾海盆沿菲律宾海沟向西消减;西南侧,则为苏禄海盆和 Celebes 海盆分别沿苏禄海沟和 Cotabato 海沟消减。与新生代 B-型消减有关的埃达克岩、HMA 和 NEB,以及岛弧正常钙碱性岩浆遍布整个群岛(Malihan, 1987; Walter *et al.*, 1981; Geary and Kay, 1987;

Sajona *et al.*, 1993, 1994, 1996, 1997, 2000; Sajona and Maury, 1998; Castillo *et al.*, 1999);同期形成的许多大型浅成热液金矿和斑岩铜矿(Sillitoe and Gappe, 1984; Mitchell and Leach, 1991; Sajona *et al.*, 1994, 1996; Sajona and Maury, 1998; Thieblemont *et al.*, 1998; Imai, 2002),使菲律宾群岛成为世界上著名的 Au、Cu 矿化集中区。

由于菲律宾岩浆弧地体的复杂性(多方向消减带的联合影响),因而不同区域的弧岩浆的性质与演化存在明显的差异。埃达克岩作为弧岩浆的组成部分也有地域性差异。鉴于此, Sajona 和 Maury(1998)分别对菲律宾群岛的北吕宋、东南吕宋、菲国中部、东棉兰老、西棉兰老和南棉兰老六个区域的埃达克岩及 Cu、Au 矿床发育情况作了统计与对比研究,并进一步在上述六个区域中选择了 19 个有代表性的矿区做岩浆-成矿关系分析,其中 16 个矿区有可利用的岩石地球化学数据。其结果为:1)在有数据的 16 个矿区中,14 个矿区的 Cu、Au 矿化与埃达克质岩浆具有时空联系,其中 11 个为直接的成因联系;2)14 个有联系的矿区中,13 个与埃达克岩或 HMA 有关,2 个与 NEB 有关,其中有一个矿区可能既与埃达克岩有关,又与 NEB 有关。由此看来,菲律宾复杂弧地体的 Cu、Au 矿化的确与埃达克质岩石之间存在十分密切的时空和成因联系,这与 Thieblemont *et al.* (1997) 对全球 Cu、Au 矿床的统计情况结果一致。从菲律宾群岛的构造环境来看,这里的埃达克质岩石显然与板片熔融机制和板片熔体交代的地幔有关(Sajona *et al.*, 2000; Schiano *et al.*, 1995)。至于板片熔融发生的具体情况和诱发因素(例如,初始消减、消减结束等),有待于具体分析与研究。Sajona 和 Maury(1998)承认,尽管在菲律宾群岛可以确认埃达克质岩浆与 Cu、Au 矿化关系密切,但造成这种密切关系的原因并不清楚。目前还没有证据可以说明,埃达克质岩浆比正常的岛弧钙碱性岩浆在其形成时就有更为富集 Cu、Au 等成矿元素。但是,板片熔融过程对于硫化物循环和携带能力,一般认为要比板片脱水过程生成水流体的相应能力要强,也更为有效。通过对菲律宾 Mankayan 矿床的精细年代学研究发现,并非整个埃达克岩浆活动期(2.2~0.9 Ma)都有矿化发生,而矿化仅仅发生在埃达克岩浆期中间的一段时间(1.5~1.2 Ma)(Sajona and Maury, 1998)。这一发现与中安第斯的研究结果一致(Kay and Mpodozis, 2001),其原因也可能相似。

对于埃达克岩岩浆是否具有与生俱来的 Cu-Au 成矿倾向性问题,菲律宾 1991 年 Pinatubo 山的活火山活动,提供了一个可直接观察的埃达克岩成矿的现代实例(Hattori, 1993; Pasteris, 1996; Imai *et al.*, 1993, 1996)。该火山的喷发物为埃达克质、富含硬石膏的英安质多孔浮岩,喷发时大规模的火山脱气使大约从岩浆中排出 2000 万吨 SO<sub>2</sub> 进入大气(Hunt, 1991),同时在火山口发育明显的 Cu 矿化。斑岩矿化系统是一个富硫、富水流体、高氧逸度( $f_{O_2}$  介于 NNO 和 HM 氧缓冲之间)的岩浆热液系统,硬石膏是这种矿化系统中一个十分重要标志性含硫矿物,它大约吸收系统中硫总量



的一半 (Hunt, 1991)。Pinatubo 埃达克质岩浆具有斑岩矿化系统的上述典型的成分特征 (Imai *et al.*, 1993, 1996), 只不过它不是浅成侵入而是火山喷发。或许正如 Oyarzun *et al.* (2001)所指出的那样,火山是一个“开放系统”,火山脱气使大量的  $\text{SO}_2$  和水流体从体系中散失而不利于成矿。因此, Pasteris (1996) 将 Pinatubo 山岩浆系统看作一个“失败的”斑岩铜矿 (“negative” porphyry copper deposit)。

## 5 讨论与结论

### 5.1 埃达克质岩石的形成环境具有多样性

埃达克岩是依据岩石地球化学特点而定义的一类火成岩,最早为了解释其岩石成因才赋予“年轻热洋壳部分熔融”这一特定环境与源区涵义。我们知道,岩石地球化学特征只反映岩浆的源岩特点、岩浆产生的物理化学条件及后续的岩浆演化过程,而与构造环境并无直接的关系。这也是后来出现诸如“缓消减板片地幔加热熔融”、“撕裂板片边缘软流圈地幔烘烤熔融”、“加厚基性下地壳部分熔融”等成因解释的原因。玄武质岩石的高温高压熔融实验 (Rapp *et al.*, 1991, 1999), 与其说证实了板片熔融产生埃达克岩浆,倒不如说证实了广义的镁铁质岩石在高压条件下发生熔融都可以产生埃达克质熔体。最近 Litvinovsky *et al.* (2000) 对紫苏花岗岩和淡色花岗岩在 1.5 ~ 2.5 GPa 压力条件下的熔融实验,同样获得了类似于埃达克岩较富硅端元的部分熔体(其残留组合为酸性高压麻粒相)。所有这些高压熔融实验结果指向一个共同结果:在强烈加厚陆壳条件下,只要有某种深部机制提供足够的热能,几乎所有常见的地壳岩石(从酸性岩到基性岩)的部分熔融,都会产生类似于埃达克岩特征的岩浆。因此,埃达克岩可以在不同的地球动力学环境中产生,而板片熔融只是其中一个可能的选项。

### 5.2 关于埃达克岩与 Cu、Au 成矿作用

根据目前已有的资料,环太平洋地区与新生代消减事件有关的埃达克岩(板片熔融或者新生基性下地壳熔融),的确与斑岩铜矿和浅成热液金矿的形成存在相当密切的时空与成因联系。而且人们发现,对于一个特定的埃达克岩浆阶段(期),只有其中一段时间的埃达克岩浆才与矿化有关 (Sajona and Maury, 1998; Kay and Mpodozis, 2001),其原因据信是这段时间里形成的岩浆富含水流体和挥发分(源区大量角闪石分解所致) (Kay and Mpodozis, 2001),认为过高或偏低的 Sm/Yb 比值的埃达克岩浆都不利于成矿,这显然与源区条件(尤其是压力)有关。可以预见,随着研究的深入,会有更多的类似于 Sm/Yb 比值的一些地球化学指标提出来(如 Sr/Yb 等),作为成矿与无矿埃达克岩定量判据。也会有更具说服力的其它地质-地球化学证据来这种联系的本质。开展对含矿埃达克岩与无矿埃达克岩、含矿埃达克岩与含矿的非埃达克岩、无矿埃达克岩与无矿非埃达克岩之间的深入

对比研究,以及将矿化与岩浆作为统一的物质系统进行全面的研究,将有助于揭示埃达克岩与 Cu-Au 矿化的成因联系,并最终确立其岩浆成矿专属性。

## References

- Atherton MP, Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362: 144 - 146
- Atherton MP and Sanderson LM. 1985. The chemical variation and evolution of the superunits of the segmented Coastal Batholith. In: Pitcher WS, Atherton MP, Cobbing EJ and Beckinsale RD (eds.): *Magmatism at A Plate Edge: the Peruvian Andes*. Glasgow: Blackie Halstead Press, 207 - 228
- Atherton MP and Sanderson LM. 1987. The Cordillera Blanca Batholith: a study of granite and the relation of crustal thinking to peraluminosity. *Geologische Rundschau*, 76: 213 - 232
- Baldwin JA, Pearce JA. 1982. Discrimination of productive and nonproductive porphyritic intrusions in the Chilean Andes. *Economic Geology*, 77: 664 - 674
- Bateman P. 1992. Plutonism in the central part of the Sierra Nevada Batholith, California. USGS Professional Paper, 1483: 1 - 186
- Bellon H, Rangin C. 1991. Geochemistry and isotopic dating of Cenozoic volcanic arc sequences around the Celebes and Sulu seas, in: Silver EA, Rangin C, von Braymann MT *et al.* (Eds.), *Proc. ODP Sci. Res.* 124: 321 - 338
- Bellon H, Yumul GP Jr. 2000. Mio-Pliocene magmatism in the Baguio Mining District (Luzon, Philippines): age clues to its geodynamic setting. *C. R. Acad. Sci. Paris, series Ila* 331: 295 - 302
- Bellon H, GP Yumul Jr. 2001. Miocene to Quaternary adakites and related rocks in Western Philippine arc sequences. *Earth and Planetary Sciences*, 333: 343 - 350
- Beate B, Monzier M, Spikings R, Cotten J, Silva J, Bourdon E, Eissen J-P. 2001. Mio-Pliocene adakite generation related to flat subduction in Southern Ecuador: the Quimsacocha volcanic center. *Earth and Planetary Science Letters*, 192: 499 - 508
- Benard AK, Weber B, Weis D, Albrecht A, Hattori K, Klein J, Oles D. 1996. Petrology and geochemistry of the 1991 eruption products of Mount Pinatubo (Luzon; Philippines). In: Newhall V, Punongbayan R (eds.), *Fire and Mud: eruption and lahars of Mount Pinatubo*, Quezon City, Philippine Institute of Volcanology and Seismology, and University of Washington Press, Seattle, 767 - 789
- Bissig T, Clark, AH, Lee JKW, Heather KB. 2000. Revised metallogenetic model for the El Indio Pascua/Lama Au (Ag, Cu) belt, Regions III/IV, Chile and Provincia San Juan, Argentina. *GSA Abstracts with Programs*, 32: A372
- Bissig T, Clark AH, James K, Lee W, von Quadt A. 2003. Petrogenetic and metallogenetic responses to Miocene slab flattening: new constraints from the El Indio-Pascua Au Ag Cu belt, Chile/Argentina. *Mineralium Deposita*, 38: 844 - 862
- Bourdon E, Eissen J-P, Gutscher M-A, Monzier M, Samaniego P, Robin C, Bollinger C, Cotton J. 2002a. Slab melting and slab melt metasomatism beneath the North Andean Volcanic Zone: adakites and high-Mg andesites from Pichincha volcano. *Bull. Soc. Geol. Fr.*, 173: 195 - 206

- Bourdon E, Eissen J-P, Monzier M-A, Robin C, Martin H, Cotten J, Hall ML. 2002b. Adakite-like lavas from Antisana volcano: evidence for slab melt metasomatism beneath the Andean Northern Volcanic Zone. *Journal of Petrology*, 43: 199–217
- Cai JH, Yan GH, Chang ZS, Wang XF, Shao HX, Chu ZY. 2003. Petrological and geochemical characteristics of the Wanganzhen complex and discussion on its genesis. *Acta Petrologica Sinica*, 19 (1): 81–92 (in Chinese with English abstract)
- Cardwell RK, Isacks BL, Karig DE. 1980. The spatial distribution of earthquakes, focal mechanism solutions and subducted lithosphere in the Philippines and northern Indonesian regions. In Hayes E (ed.). *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands. Part 1, AGU Monogr.*, 23: 1–35
- Carroll MR, Wyllie PJ. 1989. Experimental phase relations in the system tonalite-peridotite-H<sub>2</sub>O at 15 kb: implications for assimilation and differentiation processes near the crust-mantle boundary. *Journal of Petrology*, 30: 1351–1382
- Castillo PR, Janney PE, Solidum RU. 1999. Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134: 33–51
- Chiaradia M, Fontbot L, Beate B. 2003. Cenozoic continental arc magmatism and associated mineralization in Ecuador. *Mineralium Deposita*, 126(3): 397–405
- Clark AH. 1993. Are outsized porphyry copper deposits either anatomically or environmentally distinctive? *Society of Economic Geologists Special Publication No 2*, Littleton, Colorado, 213–283
- Coira B, Kay, SM, Viramonte J. 1993. Upper Cenozoic magmatic evolution of the Argentine Puna – A model for changing subduction geometry. *International Geology Review*, 35: 677–720
- Cornejo P, Tosdal RM, Mpodozis C, Tomlinson AJ, Rivera O, Fanning CM. 1997. El Salvador, Chile porphyry copper deposit revisited: geologic and geochronologic framework. *International Geology Review*, 39: 22–54
- Crawford AJ, Falloon TJ, Eggins S. 1987. The origin of island arc high-alumina basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 97: 417–430
- Defant MJ, Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere, *Nature*, 347: 662–665
- Defant MA, de Boer JZ, Oles D. 1988. The western Central Luzon volcanic arc, Philippines: two arcs divided by rifting? *Tectonophysics*, 145: 305–315
- Defant MJ, Maury RC, Ripley EM, Feigenson MD, Jacques D. 1991. An example of island-arc petrogenesis: geochemistry and petrology of the southern Luzon arc, Philippines. *Journal of Petrology*, 32: 455–500
- Defant MJ, Richerson PM, DeBoer JZ, Stewart RH, Maury RC, Bellon H, Drummond MS, Feigenson MD, Jackson TE. 1991. Dacite genesis via both slab melting and differentiation: petrogenesis of La Yeguada volcanic complex, Panama. *Journal of Petrology*, 32: 1101–1142
- Deng Jinfu, Zhaohailing, Mo Xuanxue, Wu Zongxu and Luo Zhaoahua. 1996. Continental roots-plume tectonics of China Key to the continental dynamics. Beijing: Geological Publishing House. 1–110
- Deng Jinfu, Mo Xuanxue, Zhaohailing, Luo Zhaoahua and Du Yangsong. 1994. Lithospheric root/ de-rooting and activation. *Journal of Graduate School, China University of Geosciences*, 8(3): 350–356
- Drummond MS, Defant MJ. 1990. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons. *Journal of Geophysical Research*, 95 (13): 21503–21521
- Drummond MS, Defant MJ, Kepezhinkas PK. 1996. The petrogenesis of slab derived trondhjemite-tonalite-dacite/adakite magmas. *Transactions R. Soc. Edinb. Earth Sci.*, 87: 205–216
- Drummond MS, Neilson MJ, Allison DT and Tull JF. 1997. Igneous petrogenesis and tectonic setting of granitic rocks from the eastern Blue Ridge and Inner Piedmont, Alabama Appalachians. In: Sinha AK, Whalen JB and Hogan JP (eds.) *The Nature of Magmatism in the Appalachian Orogen: Boulder, Colorado*, Geological Society of America Memoir, 191: 147–164
- Feeley TC. 1993. Crustal modification during subduction-zone magmatism: evidence from the southern Salar de Uyuni region (20°–22°S), central Andes. *Geology*, 21: 1019–1022
- Gervasio FC. 1971. Geotectonic developments of the Philippines. *Journal of Geological Society, Philippines*, 25: 18–38
- Gonzalez-Partida E, Levressea G, Carrillo-Chavez A, Cheilletzb A, Gasquet D, Jones D. 2003. Paleocene adakite Au-Fe bearing rocks, Mexcala, Mexico: evidence from geochemical characteristics. *Journal of Geochemical Exploration*, 80: 25–40
- Green TH. 1994. Experimental studies of trace-element partitioning applicable to igneous petrogenesis – Sedona, 16 years later. *Chemical Geology*, 117: 1–36
- Gutscher MA, Maury RC, Eissen J-P, Bourdon E. 1999. Can slab melting be caused by flat subduction? *Geology*, 28 (6): 535–538
- Hattori K. 1993. High-sulfur magma, a product of fluid discharge from underlying mafic magma: evidence from Mount Pinatubo, Philippines. *Geology*, 21: 1083–1086
- Hawkesworth CJ, Clarke C. 1994. Partial melting in the lower crust: new constraints on crustal contamination processes in the central Andes. In: Reutter KJ, Scheuber E, Wigger PJ (eds.), *Tectonics of the Southern Central Andes: Structure and Evolution of An Active Continental Margin*. Springer, Berlin Heidelberg New York, 93–101
- Hedenquist JW, Lowenstern JB. 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 70: 519–526
- Hedenquist JW, Richards JP. 1998. The influence of geochemical techniques on the development of genetic models for porphyry copper deposits. In: Richards JP, Larson PB (eds.), *Techniques in hydrothermal ore deposits geology*. *Rev Econ Geol*, 10: 235–256
- Hess PC. 1989. *Origin of Igneous Rocks*. Harvard University Press, Cambridge, Mass. 1–336
- Hildreth W, Moorbath S. 1988. Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of central Chile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98: 455–489
- Honda S. 1985. Thermal Structure beneath Tohoko, northeast Japan. A case study and preliminary approach on the origin of arc volcanism. In Shimozuru D, Yokoyama I (eds) *Arc Volcanism*, 117–140
- Imai A. 2002. Metallogenesis of porphyry Cu deposits of the Western Luzon arc, Philippines: K-Ar ages, SO<sub>3</sub> contents of microphenocrystic apatite and significance of intrusive rocks.

- Resource Geology, 52(2): 147–161
- Imai A, Listanco EL, Fuji T. 1993. Petrologic and sulfur isotopic significance of highly oxidized and sulfur-rich magma of Mt. Pinatubo, Philippines. *Geology*, 21: 699–702
- Imai A, Listanco EL, Fuji T. 1996. Highly oxidized and sulfur-rich dacitic magma of Mount Pinatubo; implication for metallogenesis of porphyry mineralization in the western Luzon arc. In: Newhall CG, Punongbayan RS (eds.), *Fire and mud. Eruptions and lahars of Mount Pinatubo, Philippines*. Philippine Institute of Volcanology and Seismology, Quezon City, University of Washington Press, Seattle, 865–874
- Isacks BL. 1988. Uplift of the central Andean plateau and bending of the Bolivian orocline. *Journal of Geophysical Research*, 93: 3211–3231
- James DE, Sacks JW. 1999. Cenozoic formation of the central Andes: A geophysical perspective, in Skinner B, ed., *Geology and Ore Deposits of the Central Andes*. Society of Economic Geology Special Publication, 7: 1–25
- Johnson K, Barnes CG and Miller CA. 1997. Petrology, geochemistry, and genesis of high-Al tonalite and trondhjemites of the Cornucopia Stock, Blue Mountains, Northeastern Oregon. *Journal of Petrology*, 38(11): 1585–1611
- Johnston AD, Wyllie PJ. 1989. The system tonalite peridotite  $H_2O$  at 30 kbar, with applications to hybridization in subduction zone magmatism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 102: 257–264
- Kay RW. 1978. Aleutian magnesian andesite: melts from subducted Pacific ocean crust. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 4: 117–132
- Kay RW, Kay SM. 1991. Creation and destruction of lower continental crust. *Geologische Rundschau*, 80: 259–278
- Kay RW, Kay SM. 1993. Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics*, 219: 177–189
- Kay SM, Abbruzzi, JM. 1996. Magmatic evidence for Neogene lithospheric evolution of the central Andean "flat slab" between 30° and 32°S. *Tectonophysics*, 259: 15–28
- Kay SM, Gordillo CE. 1994. Pocho volcanic rocks and the melting of depleted continental lithosphere above a shallowly dipping subduction zone in the central Andes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 117: 25–44
- Kay SM, MaksaeV, Moscoso R, Mpodozis C, Nasi C. 1987. Probing the evolving Andean lithosphere: Mid-Late Tertiary magmatism in Chile (29°–30°S) over the modern zone of subhorizontal subduction. *Journal of Geophysical Research*, 92: 6173–6189
- Kay SM, Mpodozis C. 1999. Setting and origin of Miocene giant ore deposits in the central Andes. PACRM99, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series, 44, 5–12
- Kay SM and Mpodozis C. 2001. Central Andean ore deposits linked to evolving shallow subduction systems and thickening crust. *GSA Today*, 11(3): 4–9
- Kay SM, Mpodozis C. 2002. Magmatism as probe to the Neogene shallowing of the Nazca plate beneath the modern Chilean flat slab. *Journal of South American Earth Sciences*, 15: 39–57
- Kay SM, Mpodozis C, Coira B. 1999. Magmatism, tectonism, and mineral deposits of the central Andes (22°–33°S), in Skinner BJ (ed.), *Geology and Ore Deposits of the Central Andes*. Society of Economic Geologist Special Publications 7, 27–59
- Kay SM, Mpodozis C, Ramos VA, Munizaga F. 1991. Magma source variations for mid-late Tertiary magmatic rocks associated with a shallowing subduction zone and a thickening crust in the central Andes (28° to 33°S) Argentina, in Harmon RS and Rapela CW (eds.), *Andean magmatism and its tectonic setting*. Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 265, 113–137
- Kay SM, Mpodozis C, Tittler A, Cornejo P. 1994. Tertiary magmatic evolution of the Maricunga mineral belt in Chile. *International Geology Review*, 36: 1079–1112
- Kelemen PB. 1995. Genesis of high  $Mg^{\#}$  andesites and the continental crust. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 120: 1–19
- Kelemen PB, Shimizu N, Dunn T. 1993. Relative depletion of niobium in some arc magmas and the continental crust: partitioning of K, Nb, La and Ce during melt/rock reaction in the upper mantle. *Earth Planetary Science Letters*, 120: 111–134
- Keppeler H. 1996. Constraints from partitioning experiments on the composition of subduction-zone fluids. *Nature*, 380: 237–240
- Kepezhinskas PK, Defant MJ, Drummond MS. 1995. Na metasomatism in the island-arc mantle by slab melt peridotite interaction: evidence from mantle xenoliths in the North Kamchatkan Arc. *Journal of Petrology*, 35: 1505–1527
- Kepezhinskas PK, Defant MJ, Drummond MS. 1996. Progressive enrichment of island arc mantle by melt-peridotite interaction inferred from Kamchatka xenoliths. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60: 1217–1229
- Klein M, Stosch H-G, Seck, HA. 1997. Partitioning of high field-strength and rare-earth elements between amphibole and quartz-dioritic to tonalitic melts: an experimental study. *Chemical Geology*, 138: 257–271
- Kurtz A, Kay SM, Charrier R, and Farrar E. 1997. Geochronology of Miocene plutons and Andean uplift history in the El Teniente region, central Chile (34–35°S): *Revista Geológica de Chile*, 24: 75–90
- Litvinovsky BA, Steele IM and Wickham SM. 2000. Silicic magma formation in overthickened crust: melting of charnockite and leucogranite at 15, 20 and 25 kbar. *Journal of Petrology*, 41(5): 717–737
- Liu HT, Sun SH, Liu JM and Zhai MG. 2002a. The Mesozoic high-Sr granitoids in the northern marginal region of North China Craton: geochemistry and source region. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 257–274 (in Chinese with English abstract)
- Liu HT, Zhai MG, Liu JM and Sun SH. 2002b. The Mesozoic granitoids in the northern marginal region of North China Craton: evolution from post-collisional to anorogenic. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 433–448 (in Chinese with English abstract)
- Maliha TD. 1987. The gold-rich Dizon porphyry copper mine in the western central Luzon Island, Philippines: Its geology and tectonic setting. *Proceedings of the Pacific Rim Congress 87*, Australian Institute of Mining and Metallurgy, Parkville, Victoria, Australia, 303–307
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: modern analogues of Archean granitoids. *Lithos*, 46: 411–429
- Maury RC, Defant MJ, Joron J-L. 1992. Metasomatism of the sub-arc mantle inferred from trace elements in Philippine xenoliths. *Nature*, 360: 661–663

- Molnar P, England PC, 1990. Temperatures, heat flux and friction stress near major thrust faults. *Journal of Geophysical Research*, 95: 4833–4856
- Morozumi H. 2003. Geochemical characteristics of granitoids of the Erdenet Porphyry copper deposit, Mongolia. *Resource Geology*, 53(4): 311–316
- Morris PA, 1995. Slab melting as an explanation of Quaternary volcanism and aseismicity in southwest Japan. *Geology*, 23: 395–398
- Norman MD, Leeman WP and Mertzman SA. 1992. Granites and rhyolites from the northwestern U. S. A.: temporal variation in magmatic processes and relations to tectonic setting. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83: 71–81
- Oyarzun R, Marquez A, Lillo J, Lopez I, Rivera S. 2001. Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: adakitic versus normal calc-alkaline magmatism. *Mineralium Deposita*, 36: 794–798
- Oyarzun R, Marquez A, Lillo J, Lopez I, Rivera S. 2002. Reply to Discussion on Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: adakitic versus normal calc-alkaline magmatism by Oyarzun R, Marquez A, Lillo J, Lopez I, Rivera S (*Mineralium Deposita*, 36: 794–798, 2001). *Mineralium Deposita*, 37: 795–799
- Pasteris JD, 1996. Mount Pinatubo volcano and negative porphyry copper deposits. *Geology*, 24: 1075–1078
- Patino Douce AE. 2000. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas? In: Castro A, Fernandez C, Vigneresse JL (Eds.), *Understanding Granites: Integrating New and Classical Techniques*. Geological Society of London Special Publications, 168: 55–75
- Peacock SM, Rushmer T, Thompson AB, 1994. Partial melting of subducting oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 121: 27–244
- Petford N and Atherton MP. 1992. Granitoid emplacement and deformation along a major crustal lineament: the Cordillera Blanca, Peru. *Tectonophysics*, 205: 171–185
- Petford N, Atherton MP, 1996. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: the Cordillera Blanca batholith. Peru. *Journal of Petrology*, 37: 1491–1521
- Petford N, Atherton MP, Halliday AN, 1996. Rapid magma production rates, underplating and remelting in the Andes: isotopic evidence from northern-central Peru (9–11 S). *Journal of South American Earth Sciences*, 9: 69–78
- Petford N, Gallagher K. 2001. Partial melting of mafic (amphibolitic) lower crust by periodic influx of basaltic magma. *Earth and Planetary Science Letters*, 193: 483–499
- Polat A and Kerrich R. 2001. 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. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141: 36–52
- Prouteau G, Scaillet B, Pichavant M, Maury RC, 1999. Fluid present melting of oceanic crust in subduction zones. *Geology*, 27: 1111–1114
- Prouteau G, Scaillet B, Pichavant M, Maury RC. 2001. Evidence for mantle metasomatism by hydrous silicic melts in subduction zones. *Nature*, 410: 197–200
- Rabbia OM, Hernandez LB, King RW, Lopez-Escobar L. 2002. Discussion on "Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: adakitic versus normal calc-alkaline magmatism" by Oyarzun *et al.* *Mineralium Deposita* 36: 794–798, 2001). *Mineralium Deposita*, 37: 791–794
- Rabbia OM, Reich M, Hernandez LB, King RW, Lopez-Escobar L. 2000. High-Al TTG-like suite at the El Teniente porphyry copper deposit, Chile. 9th Congreso Geológico Chileno Puerto Varas, Abstr. 1: 326–330
- Rangin C. 1991. The Philippine Mobile Belt: a complex plate boundary. *Journal Southeast Asian Earth Sciences*, 6: 209–220
- Rapp PR. 1997. Heterogeneous source regions for Archean granitoids. in: de Wit MJ, Ashwal LD (eds.), *Greenstone Belts*. Oxford University Press, Oxford
- Rapp RP, Shimizu N, Norman MD. 2003. Growth of early continental crust by partial melting of eclogite. *Nature*, 425: 605–609
- Rapp RP, Shimizu N, Norman MD, Applegate GS. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160: 335–356
- Rapp RP, Watson EB, 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8–12 kbar: implications for continental growth and crust mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36: 891–931
- Rapp RP, Watson EB, Miller CF, 1991. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalites. *Precambrian Research* 51: 1–25
- Reich M, Parada MA, Palacios C, Dietrich A, Schultz F, Lehmann B. 2003. Adakite-like signature of Late Miocene intrusions at the Los Pelambres giant porphyry copper deposit in the Andes of central Chile: metallogenic implications. *Mineralium Deposita*, 38: 876–885
- Richards JP. 2002. Discussion on Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: adakitic versus normal calc-alkaline magmatism by Oyarzun *et al.* (*Mineralium Deposita*, 36: 794–798, 2001). *Mineralium Deposita*, 37: 88–790
- Richards JP, Boyce AJ, Pringle MS. 2001. Geologic evolution of the Escondida area, northern Chile: a model for spatial and temporal localization of porphyry copper mineralization. *Economic Geology*, 96: 271–305
- Richards JP, Noble SR, Pringle MS. 1999. A revised Late Eocene age for porphyry Cu magmatism in the Escondida area, northern Chile. *Economic Geology*, 94: 1231–1247
- Sajona FG, Bellon H, Maury RC, Pubellier M, Cotten J, Rangin C. 1994. Magmatic response to abrupt changes in geodynamic settings: Pliocene Quaternary calc-alkaline and Nb-enriched lavas from Mindanao Philippines. *Tectonophysics*, 237: 47–72
- Sajona FG, Bellon H, Maury RC, Pubellier M, Quebral RD, Cotten J, Bayron FE, Pagado E, Pamatian P. 1997. Tertiary and Quaternary magmatism in Mindanao and Leyte (Philippines): geochronology, geochemistry and tectonic setting. *Journal of Asian Earth Sciences*, 15: 121–153
- Sajona FG, Maury R. 1998. Association of adakites with gold and copper mineralization in the Philippines. *Earth & Planetary Sciences*, 326: 27–34
- Sajona FG, Maury RC, Bellon H, Cotten J, Defant M. 1996. High field strength element enrichment of Pliocene Pleistocene island arc

- basalts, Zamboanga Peninsula, Western Mindanao Philippines. *Journal of Petrology*, 37: 693–726
- Sajona FG, Maury RC, Bellon H, Cotten J, Defant MJ, Pubellie M, Rangin C. 1993. Initiation of subduction and the generation of slab melts in western and eastern Mindanao, Philippines. *Geology*, 21: 1007–1010
- Sajona FG, Maury RC, Prouteau G, Cotten J, Schiano P, Bellon H, Fontaine L. 2000a. Slab melts as metasomatic agents in island arc magma mantle sources, Negros and Batan (Philippines). *The Island Arc*, 9: 472–486
- Sajona FG, Maury RC, Pubellier M, Leterrier J, Bellon H, Cotton J. 2000b. Magmatic source enrichment by slab-derived melts in a young post-collision setting, central Mindanao Philippines. *Lithos*, 54: 173–206
- Sasso A, and Clark AH. 1998. The Farallon Negro group, northwest Argentina: Magmatic, hydrothermal, and tectonic evolution and implications for Cu-Au metallogeny in the Andean backarc. *Society of Economic Geologists Newsletter*, 34: 1–18
- Schiano P, Clocchiatti R, Shimizu N, Maury RC, Jochum KP, Hofmann AW. 1995. Hydrous, silica-rich melts in the sub-arc mantle and their relationship with erupted arc lavas. *Nature*, 377: 595–600
- Sen C, Dunn T. 1994. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5 and 2.0 GPa: implications for the origin of adakites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 117: 394–409
- Sen C, Dunn T. 1995. Experimental modal metasomatism of a spinel lherzolite and the production of amphibole-bearing peridotite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119: 394–409
- Serrano L, Vargas V, Stambrook V, Aguilar C, Galea M, Holmgren C, Contreras A, Godoy S, Veloso I, Skewes MA, Stern CR. 1996. The Late Miocene to Early Pliocene Rio Blanco-Los Bronces copper deposit, central Chilean Andes. In: Camus F, Sillitoe RH, Petersen R (eds.), *Andean Copper Deposits: New Discoveries, Mineralization, Styles and Metallogeny*. Society of Economic Geologists Special Publications, 5: 119–130
- Shao Jian, Liu Futian, Chen Hui and Han Qingjun. 2001. Relationship between Mesozoic magmatism and subduction in Da Hinggan Yanshan Area. *Acta Geologica Sinica*, 75(1): 56–63
- Shinjo R. 1999. Geochemistry of high Mg andesites and the tectonic evolution of the Okinawa Trough Ryukyu arc system. *Chemical Geology*, 157: 69–88
- Sillitoe RH. 1973. Geology of the Los Pelambres porphyry copper deposit, Chile. *Economic Geology*, 68: 1–10
- Sillitoe RH. 1988a. Epochs of intrusion-related copper mineralization in the Andes. *Journal South American Earth Sciences*, 1: 89–108
- Sillitoe RH. 1988b. Gold deposits in western Pacific Island arcs: the magmatic connection. *Economic Geology Monogr.*, 6: 274–291
- Sillitoe RH, Gappe IM Jr. 1984. Philippine Porphyry Deposits: Geologic settings and characteristics. In: United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, Bangkok, CCOP Technical Publication, 14–89
- Skewes MA, Stern CH. 1994. Tectonic trigger for the formation of late Miocene Cu-rich metabreccias in the Andes of central Chile. *Geology*, 22: 551–554
- Skewes, MA, Stern CH. 1997. Late Miocene mineralized breccias in the Andes of central Chile: Sr- and Nd-isotopic evidence for multiple magmatic sources. In: Camus F *et al.* (eds.), *Society of Economic Geologists Special Publications* 6, 551–554
- Smithies RH. 2000. The Archean tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakite. *Earth and Planetary Science Letters*, 182: 115–125
- Stern CR. 1991. Role of subduction erosion in the generation of Andean magmas. *Geology*, 19: 79–81
- Stern CR, Kilian R. 1996. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123: 263–281
- Thieblemont D. 1999. Discrimination between mantle- and crustal-Andean calc-alkaline lavas. *Earth & Planetary Sciences*, 329: 243–250
- Thieblemont D, Stein G, Lescuyer J-L. 1997. Epithermal and porphyry deposits: the adakitic connection. *Earth & Planetary Sciences*, 325: 103–109
- Titley SR, Beane RE. 1981. Porphyry copper deposits: Part I. Geologic settings, petrology and tectogenesis. *Economic Geology* (75th Anniversary), 214–234
- Tosdal RM. 1995. Metal source differences in Cenozoic porphyry Cu Mo Au deposits in the central Chilean Andes between 26° and 28°S: an influence on the size of porphyry deposits? In: Clark AH (ed.), *Proceedings of the Second Giant Ore Deposits Workshop*, Kingston, On giant ore deposits II: controls on the scale of orogenic magmatic-hydrothermal mineralization. 137–151
- Tosdal RM, Richards JP. 2001. Magmatic and structural controls on the development of porphyry Cu Mo Au deposits. In: Richards JP, Tosdal RM (eds.), *Structural controls on ore genesis*. *Rev Econ Geol*, 14: 157–181
- Vila T, Sillitoe RH. 1991. Gold-rich porphyry systems in the Maricunga belt, northern Chile. *Economic Geology*, 86: 1238–1260
- Wang Q, Xu JF, Wang JX. 2000. Confirmation of adakite-type grey gneiss in the north Dabie Mts. and its relation of ultrahigh-pressure metamorphism. *Chinese Science Bulletin*, 45: 1017–1024 (in Chinese)
- Wang Y, Zhang Q. 2001. A granitoid complex from Badaling area, North China: composition, geochemical characteristics and its implication. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 533–540 (in Chinese with English abstract)
- Wang YL, Zhang Q, Wang Q, Liu HT, Wang Y. 2003. Study on adakitic rock and Cu-Au mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 575–584 (in Chinese with English abstract)
- Williamson BJ, Downes H and Thirlwall. 1992. The relationship between crustal magmatic underplating and granite genesis: an example from the Velay granite complex, Massif Central, France. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83: 236–245
- Wu Fuyuan and Sun Deyou. 1999b. The Mesozoic magmatism and lithospheric thinning in the eastern China. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 29(4): 313–318
- Yang JH, Chu M-F, Liu W, Zhai MG. 2003. Geochemistry and Petrogenesis of Guojialing granodiorites from the northeastern Jiaodong Peninsula, Eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 692–700 (in Chinese with English abstract)
- Xu JF, Wang Q, Xu YG, Zhao ZH, Xiong XL. 2001. Geochemistry of Anjishan intermediate-acid intrusive rocks in Ningzhen area: constraint to origin of the magma with HREE and Y depletion. *Acta*

- Petrologica Sinica, 17(4): 575 – 584 (in Chinese with English abstract)
- Yogodzinski GM, Lees JM, Churikova TG, Dorendorf F, Woerner G, Volynets ON. 2001. Geochemical evidence for the melting of subducting oceanic lithosphere at plate edges. *Nature*, 409: 500 – 504
- Yogodzinski GM, Kay RW, Volynets ON, Koloskov AV, Kay SM. 1995. Magnesian andesite in the western Aleutian Komandorsky region: Implications for slab melting and processes in the mantle wedge. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 107: 505 – 519
- Yogodzinski GM, Kelemen PB. 1998. Slab melting in the Aleutians: implications of an ion probe study of clinopyroxene in primitive adakite and basalt. *Earth and Planetary Science Letters*, 158: 53 – 65
- Yumul GP Jr, Dimalanta CB, Bellon H, Faustino DV, Jesus JV, Tamayo RA Jr, Jumawan FT. 2000. Adakitic lavas in the Central Luzon back-arc region (Philippines): lower crust partial melting products? *The Island Arc*, 9: 499 – 513
- Yumul GP Jr, Dimalanta CB, Tamayo RA Jr, Bellon H. 2003. Silicic arc volcanism in Central Luzon, the Philippines: characterization of its space, time and geochemical relationship. *The Island Arc*, 12(2): 207 – 218
- Zhai MG and Fan QC. 2002. Mesozoic replacement of bottom crust in North China Craton: anorogenic mantle-crust interaction. *Acta Petrologica Sinica*, 18(1): 1 – 8
- Zhang Qi, Qian Qing, Wang Erqi, *et al.* 2001a. Existence of East China Plateau in mid-late Yanshan Period: implication from adakites. *Scientia Geologica Sinica*, 36(2): 248 – 255 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing, Yang JH, Wang YL, Zhao TP, Guo GJ. 2001b. The characteristics and tectonic-metallogenic significance of the adakites in Yanshan Period from eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 236 – 244 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Wang YL. 2001c. Preliminary study on the components of the lower crust in east China Plateau during Yanshanian Period: constraints on Sr and Nd isotopic compositions of adakite-like rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 505 – 513 (in Chinese with English abstract)
- 邓晋福, 杜杨松. 1994. 中国东部岩石圈根/去根作用与大陆“活化”. *现代地质*, 8(3): 350 – 356
- 邓晋福, 赵海玲, 莫宜学, 吴宗繁, 罗照华. 1996. 大陆根-柱构造—大陆动力学的钥匙. 北京:地质出版社, 1 – 110
- 刘红涛, 孙世华, 刘建明, 翟明国. 2002a. 华北北缘地区中生代高钾花岗岩类:地球化学与源区性质. *岩石学报*, 18(3): 257 – 274
- 刘红涛, 翟明国, 刘建明, 孙世华. 2002b. 华北克拉通北缘中生代花岗岩:从碰撞后到非造山. *岩石学报*, 18(4): 433 – 448
- 邵济安, 刘福田, 陈辉, 韩庆军. 2001. 大兴安岭-燕山晚中生代岩浆活动与俯冲作用关系. *地质学报*, 75(1): 56 – 63
- 王强, 许继峰, 王建新. 2000. 北大别山 Adakite 型灰色片麻岩的确定及其与超高压变质作用的关系. *科学通报*, 45: 1017 – 1024
- 王强, 许继峰, 赵振华. 2001. 一种新的火成岩—埃达克岩的研究综述. *地球科学进展*, 16(2): 201 – 208
- 王焰, 张旗. 2001. 八达岭花岗岩的组成、地球化学特征及其意义. *岩石学报*, 17(4): 533 – 540
- 王元龙, 张旗, 王强, 刘红涛, 王焰. 2003. 埃达克质岩与 Cu-Au 成矿作用关系的初步探讨. *岩石学报*, 19(3): 543 – 550
- 吴福元, 孙德有, 林强. 1999a. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生. *岩石学报*, 15(2): 181 – 189
- 吴福元, 孙德有. 1999b. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄. *长春科技大学学报*, 29(4): 313 – 318
- 许继峰, 王强, 徐义刚, 赵振华, 熊小林. 2001. 宁镇地区中生代安基山中酸性侵入岩的地球化学:亏损重稀土和钇的岩浆产生的限制. *岩石学报*, 17(4): 575 – 584
- 杨进辉, 朱美妃, 刘伟, 翟明国. 2003. 胶东地区郭家岭花岗岩闪长岩的地球化学特征及成因. *岩石学报*, 19(4): 692 – 700
- 翟明国, 樊祺诚. 2002. 华北克拉通中生代下地壳置:非造山过程的壳幔交换. *岩石学报*, 18(1): 1 – 8
- 张旗, 钱青, 王二七等. 2001a. 燕山中晚期的“中国东部高原”:埃达克岩的启示. *地质科学*, 36(2): 248 – 255
- 张旗, 王焰, 钱青, 杨进辉, 王元龙, 赵太平, 郭光军. 2001b. 中国东部埃达克岩的特征及其构造意义. *岩石学报*, 17(2): 236 – 244
- 张旗, 王焰, 王元龙. 2001c. 燕山期中国东部高原下地壳组成初探:埃达克质岩 Sr、Nd 同位素制约. *岩石学报*, 17(4): 505 – 513

#### 附中文参考文献

- 蔡剑辉, 阎国翰, 常兆山, 王晓芳, 邵宏翔, 储著银. 2003. 王安镇岩体岩石地球化学特征及成因探讨. *岩石学报*, 19(1): 81 – 92