

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*

侯增谦¹ 高永丰² 孟祥金¹ 曲晓明¹ 黄卫³

HOU ZengQian¹, GAO YongFeng², MENG XiangJin¹, QU XiaoMing¹, HUANG Wei³

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

2. 石家庄经济学院, 河北石家庄 050031

3. 西藏地勘局第六地质大队, 西藏拉萨 851400

1. Institute of Mineral Resource, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Shijiazhuang College of Economy, Shijiazhuang, 050031, China

3. Xizang Bureau of Geology and Mineral Resources, Lhasa, Tibet 851400, China

2003-09-24 收稿, 2003-12-16 改回.

Hou ZQ, Gao YF, Meng XJ, Qu XM and Huang W. 2004. Genesis of adakitic porphyry and tectonic controls on the Gangdese Miocene porphyry copper belt in the Tibetan orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2):239-248

Abstract Most porphyry Cu deposits, a main source of base metals, occur in continent and island-arcs. Cu-bearing felsic magmas were widely regarded to be derived from the basaltic parental magma that was formed by melting of the mantle wedge, metasomatized by hydrous fluid released from the subducted oceanic slab and then evolved by crystal fractionation with or without assimilation. However, the data we present here indicate that a Miocene porphyry Cu belt with large mineral potential occurs in the Tibetan collisional orogen, and Cu-bearing porphyries show the geochemical characteristics of adakites, which were mainly derived directly from the thickened mafic lower-crust or the subducted New-Tethyan oceanic slab. The porphyry Cu systems developed during post-collisional extension after rapid uplift of the Tibetan plateau before 13 ~ 18 Ma ago. Like arc-transverse faults in arc settings, SN-trending normal faulting systems across the Tibetan orogen resulted in rapid rising and localization of adakitic porphyry magmas and sufficiently separating of large-volume Cu-bearing fluids from the magmatic-hydrothermal systems.

Key words Tibet, Collisional orogen, Adakitic rock, Porphyry copper deposit, Tectonic control

摘要 作为贱金属主要来源的斑岩铜矿床,大多数产于大陆边缘和岛弧环境。普遍认为,被俯冲洋壳板片释放流体交代的地幔楔部分熔融形成的玄武质岩浆,在相对封闭系统结晶分异和/或同化混染形成含铜长英质岩浆。然而,我们的研究表明,在西藏碰撞造山带,发育一条具有巨大成矿潜力的中新世斑岩铜矿带,含铜斑岩具有埃达克岩地球化学特性,来源于被加厚的藏南镁铁质下地壳,但俯冲的新特提斯洋壳板片部分熔融也不能完全被排除。斑岩铜矿形成于陆-陆后碰撞伸展时期(13 ~ 18 Ma),即青藏高原迅速抬升之后。横切碰撞造山带的南北向正断层系统,类似于岛弧环境下的横切弧的断层系统,成为埃达克质斑岩岩浆快速上升和就位的通道与场所,并使岩浆热液系统中大量的含矿流体充分地分离而成矿。

关键词 构造控制;埃达克岩;斑岩铜矿;碰撞造山带;西藏

中图分类号 P588.13

* 本文由国家重点基础研究发展规划项目“印度-亚洲大陆主碰撞成矿作用”(项目编号:2002CB412600)资助。

第一作者简介:侯增谦,男,1961年生,博士,研究员,现从事碰撞造山与成矿作用研究。

1 引言

斑岩型矿床是 Cu、Mo (Au) 金属物质的主要来源, 它们主要形成于大陆边缘(陆缘弧)和岛弧两种构造背景。前者的典型代表为安第斯铜矿带, 后者为西环太平洋斑岩带 (Sillitoe, 1993)。产于大陆边缘的斑岩矿床被认为与地壳增厚、地块上隆和俯冲的洋壳板片由陡变缓有关 (Skewes *et al.*, 1995; Kay *et al.*, 1999; Kerrich *et al.*, 2000), 而发育于岛弧环境的斑岩矿床主要与平行弧的走滑断裂 (Richard *et al.*, 2000) 或与俯冲板片撕裂形成的横切弧的断裂有关 (Kirkham, 1998)。近来的研究表明, 在陆-陆碰撞造山带构造环境同样发育大型斑岩矿床。如受大规模走滑断裂系

统控制的藏东玉龙斑岩铜矿带, 其就位于喜马拉雅-西藏造山带, 走向上与碰撞造山带斜交 (Hou *et al.*, 2003a)。在西藏造山带中西部的冈底斯花岗岩基内发育了另一条中新世斑岩铜矿带-冈底斯斑岩铜矿带 (曲晓明等, 2001; 侯增谦等, 2003b,c) (图 1a)。该含矿斑岩具有埃克岩岩浆亲合性, 其岩浆来源被认为是俯冲的大洋板片部分熔融 (Gao *et al.*, 2003; 侯增谦等, 2003c)。本文提供的最新资料修正了原来的初步看法, 提出冈底斯斑岩铜矿带的埃克岩岩浆更可能来源于因碰撞而加厚的藏南玄武质地壳, 但新特提斯俯冲洋壳板片来源的可能性尚不能完全排除。认为冈底斯斑岩铜矿带受平行于碰撞造山带的东西向逆冲断裂构造和横切碰撞造山带的南北向正断层系统控制。

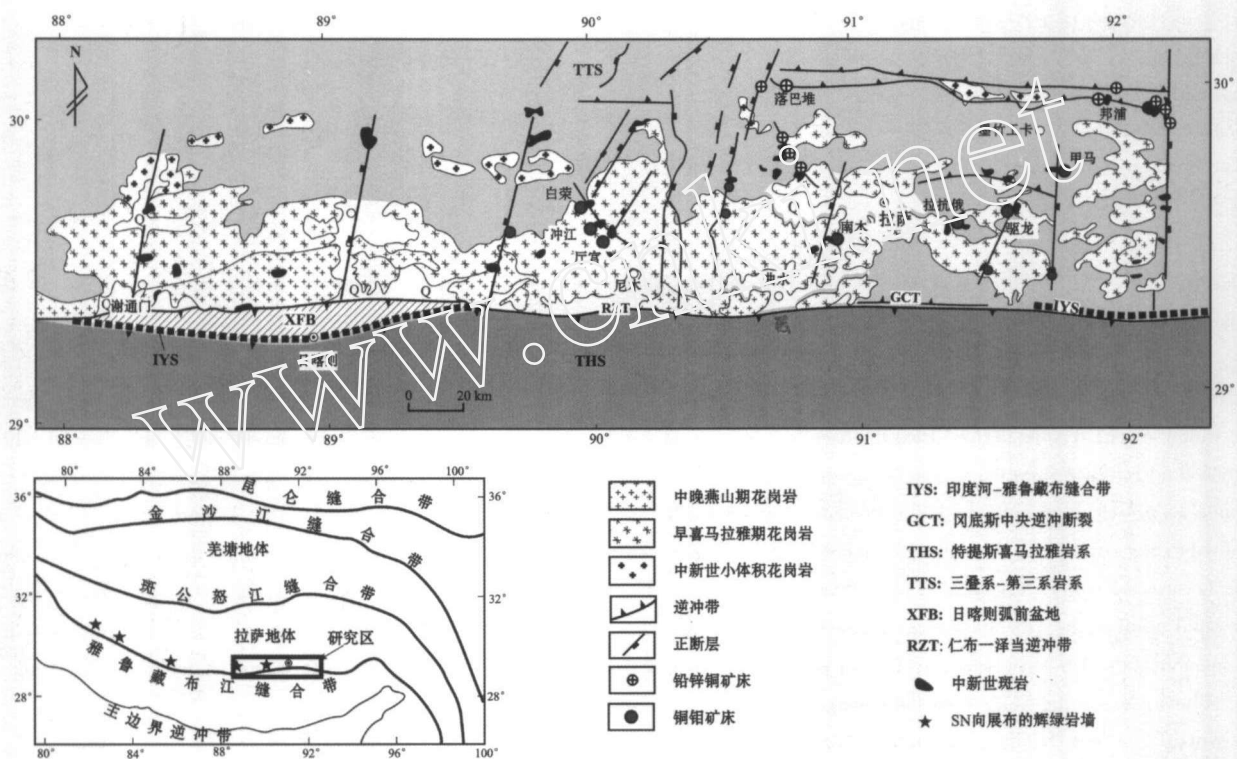


图 1 喜马拉雅-西藏造山带构造框架简图(a)和青藏高原冈底斯斑岩铜矿带略图(b)

Fig. 1 a. Simplified tectonic framework of the Himalayan-Tibetan orogen; b. Sketch map of the Gangdese porphyry copper belt on the Tibetan Plateau.

2 地质背景

青藏高原碰撞造山带由一系列的古生代和中生代地体拼合而成 (图 1a; Yin and Harrison, 2000)。尽管拉萨地体与羌塘地体于白垩纪发生碰撞已使前者地壳南北向缩短了 180 公里 (Murphy *et al.*, 1997), 但依然可以识别出横跨拉萨地体从南到北的三个不同构造单元, 即雅鲁藏布缝合带、日喀

则弧前盆地和冈底斯花岗岩弧 (图 1b; Coulon *et al.*, 1986; Durr, 1996)。冈底斯花岗岩弧由白垩纪新特提斯洋向北俯冲形成, 具有长期持续的岩浆活动 (120 ~ 70Ma), 与碰撞作用有关的花岗岩主要集中在两个高峰期, 即 55 ~ 45Ma 和 30 ~ 24Ma (Schaes *et al.*, 1984), 它们分别与印度-亚洲大规模碰撞时间和北倾的冈底斯逆冲断裂活动时间相对应 (Yin and Harrison, 2000)。在 21Ma 左右, 花岗岩基普遍出现了一次快速冷却事件 (Chen *et al.*, 1999), 暗示冈底斯在

此间发生了快速隆升 ($> 2\text{mm/a}$) (Harrison *et al.*, 1995)。由于强烈剥蚀, 目前在岩基内尚未发现成规模的 Cu-Au 矿化。在 13.5 ~ 14 Ma 以前, 该地区发生了东西向伸展作用 (Coleman and Hodges, 1995; Bilsuluk *et al.*, 2001), 形成了横切拉萨地体的南北向正断层系统 (地堑、裂谷), 并伴有南北向展布的超钾质岩墙贯入和中新世后碰撞钾质-超钾质熔岩喷发, 前者的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 13 ~ 18 Ma (Willams *et al.*, 2001), 后者为 12 ~ 25 Ma (Coulon *et al.*, 1986; Turner *et al.*, 1993; Miller *et al.*, 1999) (图 1)。伴随着中新世钾质岩浆活动, 含矿斑岩体侵位于冈底斯花岗岩基以及三叠-白垩纪地层中, 构成了一条长 350 km、宽 30 ~ 50 km 的斑岩铜矿带 (图 1b)。这些侵入体整体上东西成带, 平行于冈底斯逆冲带展布; 局部南北成串, 沿 NS 向的正断层分布, 产于以正断层系统为边界的地堑或裂陷盆地内, 反映横跨拉萨地体的张性构造系统控制了含矿斑岩的时空定位 (图 1b)。已有的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 和 K-Ar 年龄数据表明, 含铜斑岩体结晶年龄介于 17 ~ 12 Ma 之间, 其侵位高峰期在 15 ± 1 Ma 左右 (侯增谦等, 2003b)。在拉萨以西的羊八井盆地, 乌郁盆地和麻江等地, 也已发现含矿斑岩的相应喷出岩, 其喷发年龄 ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法) 变化于 16 ~ 10 Ma 之间 (Coulon *et al.*, 1986), 与含矿斑岩年龄相当。显然, 这些中新世岩浆活动紧随在冈底斯岩基剥蚀作用 (18 ~ 21 Ma; Copeland *et al.*, 1995) 和磨拉石沉积作用之后 (19 ~ 20 Ma; Harrison *et al.*, 1992), 发生在后碰撞地壳伸展环境。

3 斑岩矿化特征

初步评价工作显示, 冈底斯铜矿带至少有三个大型矿床 (甲马、驱龙、冲江, 铜资源量大于 0.5 Mt)、三个中-小型矿床 (厅宫、南木、拉抗俄, 铜资源量约 < 0.5 Mt), 矿带铜资源量据估计约 20 Mt (曲晓明等, 2001)。这些斑岩铜矿虽产于碰撞造山带环境, 但其矿化特征与岛弧环境的斑岩铜矿总体相似。

含矿斑岩体一般为浅成复式岩体, 深度和直径均小于 2 km, 少数发育爆破角砾岩筒。从岩体内部到外接触带, 矿化类型与矿化元素发生系统变化: 岩体内为细脉浸染状矿化, 形成铜钼矿体; 内接触带为细脉状、板状矿化, 形成铜钼多金属矿体; 外接触带地层内以似层状矿化为主, 形成以铅锌多金属为主的矿体。在不同矿区, 矿化类型有一定差异, 主要视含矿斑岩体侵位环境而定: 含矿斑岩侵位于早期的花岗岩基内, 则以细脉浸染状矿化为主, 如南木、冲江矿床; 斑岩侵入灰岩或火山沉积岩内, 则以细脉状、似层状矿化为主, 如甲马矿床。矿体的形态特征由矿化类型决定, 矿石矿物组合与矿化类型相对应。细脉浸染状矿化为磁铁矿-斑铜矿和黄铜矿-黄铁矿组合, 细脉状矿化为黄铜矿-辉钼矿组合, 似层状矿体为黄铁矿-斑铜矿和方铅矿-闪锌矿组合。围绕矿化岩体, 伴有多重蚀变, 一般而言, 岩体本身多为早期的钾化、硅

化蚀变, 岩体外围为晚期的绢云母化、硅化、泥化以及青磐岩化蚀变。尽管不同矿区的蚀变组合与蚀变强度不尽不同, 但钾化、硅化与青磐岩化则通常发育。在冈底斯铜矿带, 缺少与区域性构造隆升有关的蚀变类型及其相应的叠加矿化作用 (次生富集作用) 及其产物, 即表生的辉铜矿席。

4 成矿年龄

冈底斯斑岩铜矿带的成矿年龄已被矿石矿物辉钼矿的 Re-Os 同位素精细测年结果所限定。侯增谦等 (2003b) 报道了冈底斯带内南木、冲江、拉抗俄三个斑岩矿床辉钼矿的 Re-Os 同位素年龄。这些辉钼矿选自斑岩体内浸染状、细脉状矿石, 矿物组合为辉钼矿-黄铜矿、辉钼矿-黄铁矿和辉钼矿-石英。虽然辉钼矿以不同的矿物组合和不同的结构形式出现, 但与其它硫化物为同期矿化作用产物。据最佳拟合计算 (Minster *et al.*, 1979), 南木铜矿的 Re-Os 等时线年龄为 14.76 ± 0.60 Ma (2σ 误差), 冲江铜矿 Re-Os 等时线年龄为 14.00 ± 0.43 Ma (2σ 误差)。拉抗俄铜矿两个辉钼矿的 Re-Os 模式年龄分别为 13.59 Ma 和 13.63 Ma, 同以上两条等时线年龄基本一致。三个矿床的 13 个样品构成了一条拟合度很高的 Re-Os 等时线, 年龄为 14.09 ± 0.77 Ma (2σ 误差)。这些 Re-Os 同位素资料表明, 虽然上述三个铜矿床在空间上相距至少在几十公里, 但具有近乎一致的等时线年龄, 说明铜矿化事件的发生年代具有区域一致性, 成矿动力学背景具有区域统一性, 成矿作用均发生于后碰撞的伸展环境。

5 岩浆亲合性

冈底斯带含矿斑岩主要为二长花岗斑岩和石英二长花岗斑岩, 其次为含碱性长石的花岗斑岩。斑晶以长石为主, 次为石英和角闪石, 其中长石约占 40%。岩石属钾玄质和/或高钾钙碱性系列 (图 2a), 具有高 Si ($\text{SiO}_2 > 64\%$) 和高 Al ($\text{Al}_2\text{O}_3 > 15\%$ 在 $\text{SiO}_2 = 70\%$) 特征 (侯增谦等, 2003c)。与典型的俯冲板片熔融的埃达克岩相比, 以高的 $\text{Mg}^{\#} ((\text{Mg}^{+2}/\text{Mg}^{+2} + \text{Fe}^{+2}) = 0.32 - 0.74)$ 和高 K ($\text{K}_2\text{O} = 2.6 - 8.7\%$) 为特征。

冈底斯钾质斑岩富集 LILE, 其中, Rb 变化于 41 ~ 494 $\mu\text{g/g}$ 之间, Ba 变化于 555 ~ 1242 $\mu\text{g/g}$ 之间, Sr 高达 903 $\mu\text{g/g}$; 强烈亏损 HFSE (Nb, Ta, Ti), 总体上类似于与之共存的中新世 (25 ~ 12 Ma) 钾质-超钾质火山岩 (图 2b)。具有较低的 HREE (Yb: 0.94 ~ 1.92 $\mu\text{g/g}$) 和 Y 含量 ($\text{Y} = 10.56 \sim 19.31 \mu\text{g/g}$), 以及较高的 Sr/Y 和 La/Yb 比值, 处于岩石学和实验研究所确定的埃达克岩区域内 (图 2c; Defant and Drummond, 1990; Rapp and Watson, 1995)。

冈底斯钾质斑岩的 Nd-Sr 同位素组成以相对较宽的 ϵ_{Nd} (ϵ) ($5.52 \sim -6.18$) 和相对较高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ ($0.7050 \sim$

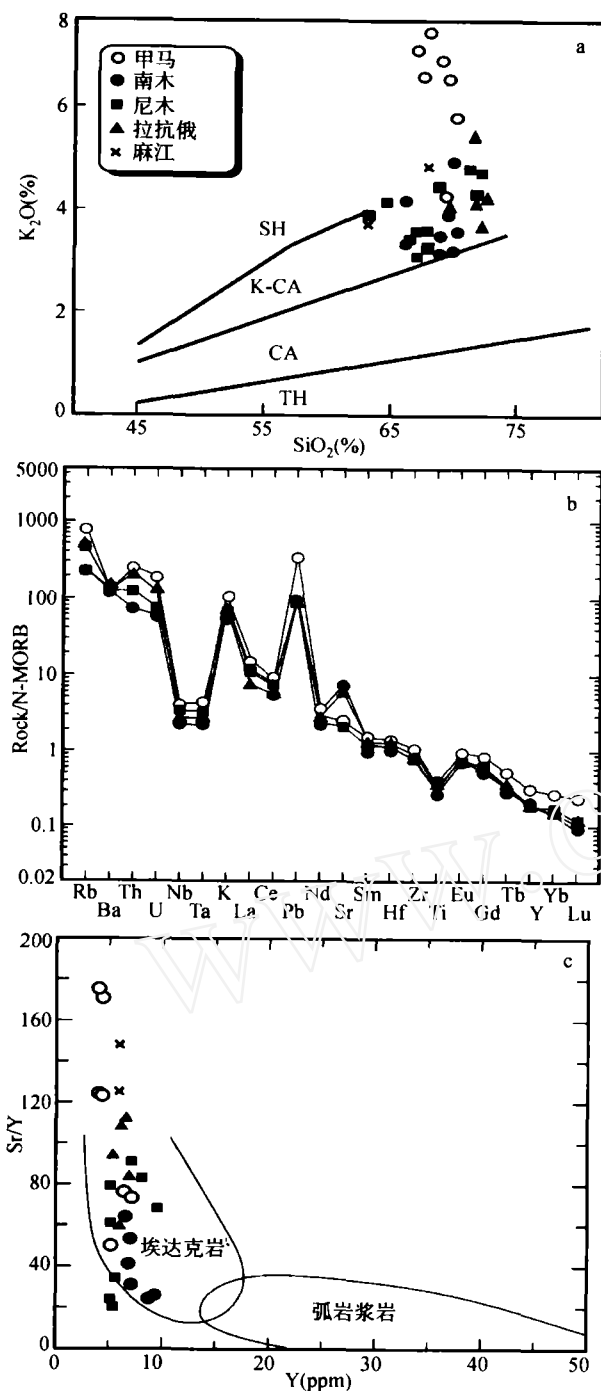


图2 冈底斯斑岩铜矿带斑岩 K_2O - SiO_2 图(a), 微量元素标准化(MORB)配分型式图(NAP)(b)和 Sr/Y - Y 图(c)。斑岩数据引自曲晓明等(2001)和 Hou *et al.* (2003d), 麻江火山岩的资料来自 Turner *et al.* (1996)

Fig. 2 K_2O - SiO_2 plot (a) of the porphyries from the Gangdese porphyry Cu belts; Normalized (by MORB) abundance patterns of trace elements (b) and Sr/Y plotted against Y (c), indicating that the Gangdese porphyries show adakite magmatic affinity (Defant and Drummond, 1990)

0.7075), 明显不同于洋壳板片熔融形成的埃达克岩, 如 adak 岛 (Kay, 1978), Cook 岛 (Stern *et al.*, 1996) 和 Cerro Pamba 埃达克岩 (Kay *et al.*, 1993) (图 3a), 但部分样品与下地壳起源的 Cordillera Blanca 埃达克质侵入岩一致 (Petford and Atherton, 1996)。在 $\epsilon_{Nd}(t) - (^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 图中, 所有的含矿斑岩变化于雅鲁藏布江 MOMB (Mahoney *et al.*, 1998) 与中新世超钾质火山岩 (Miller *et al.*, 1999) 之间, 处在 MORB 与下地壳混合线右侧 (图 3a)。

冈底斯钾质斑岩的 Pb 同位素组成以相对不变的 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 和变化较大的 $^{207}Pb/^{204}Pb$ (15.502 ~ 15.626) 和 $^{208}Pb/^{204}Pb$ (38.389 ~ 38.960) 为特征, 在图 3b 中构成一条近于垂直的阵列, 位于北半球参考线 (NHRL) 之上。该垂直趋势的两端分别对应于 MORB 和中新世超钾质火山岩, 但与雅鲁藏布 MOMB (Mahoney *et al.*, 1998) 存在明显偏离 (图 3b)。与典型的洋壳熔融的埃达克岩相比, 这些钾质斑岩具有类似的但较高的 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 比值, 表明某些斑岩富集放射成因 Pb。

总之, 冈底斯钾质斑岩既具有埃达克岩地球化学亲合性, 又有某些特殊性, 暗示其起源演化的复杂性。

6 埃达克质斑岩成因

俯冲洋壳板片部分熔融被广泛地认为是形成埃达克岩的最理想模式, 因为多数埃达克岩的地球化学特征指示其源区是一种相变为角闪榴辉岩或石榴石角闪岩的玄武质岩石 (Defant and Drummond, 1990; Peacock and Rusher, 1994; Sajona *et al.*, 2000; Gutscher *et al.*, 2000)。但是, 最近的研究表明, 还有几种不同的模式可以解释埃达克岩的成因, 如 AFC 过程 (Castillo *et al.*, 1994), 下地壳熔融 (Muir *et al.*, 1995; Petford and Atherton, 1996; Zhang *et al.*, 2001; Xu *et al.*, 2002) 和初始埃达克质熔体与地幔橄榄岩相互作用 (Keleman, 1995) 等。在藏南冈底斯带, 与钾质斑岩共生或共存的岩石主要是中新世超钾质火山岩, 后者有极高的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 比值 (>0.7150) 和 K_2O 含量以及极低的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 比值 (<-12), 其经历 AFC 过程显然不能形成冈底斯带钾质埃达克斑岩 (参见图 3a)。

在冈底斯带钾质埃达克斑岩中, Sr 的不相容元素行为和没有明显的 Eu 异常, 反映其岩浆源区无斜长石, 或者残留相无斜长石。岩石的 NAP 图 (图 2b) 和 HFSE 的强烈亏损, 表明其岩浆源区是一种含水并残留石榴石的角闪榴辉岩或石榴石角闪岩 (Defant and Drummond, 1990; Defant and Drummond, 1993; Drummond *et al.*, 1996), 因为含水条件和部分熔融过程中, Nb 偏向于进入角闪石中 (Pearce and Norry, 1979), 而 Ti 则主要集中于残留相金红石中 (Tatsumi, 1986)。斑岩的 Yb 强烈亏损和 LREE/HREE 强烈分馏也反映, 形成埃达克岩要求角闪榴辉岩或石榴石角闪岩发生大约 10% ~ 25% 的部分熔融 (Defant and Drummond, 1990)。

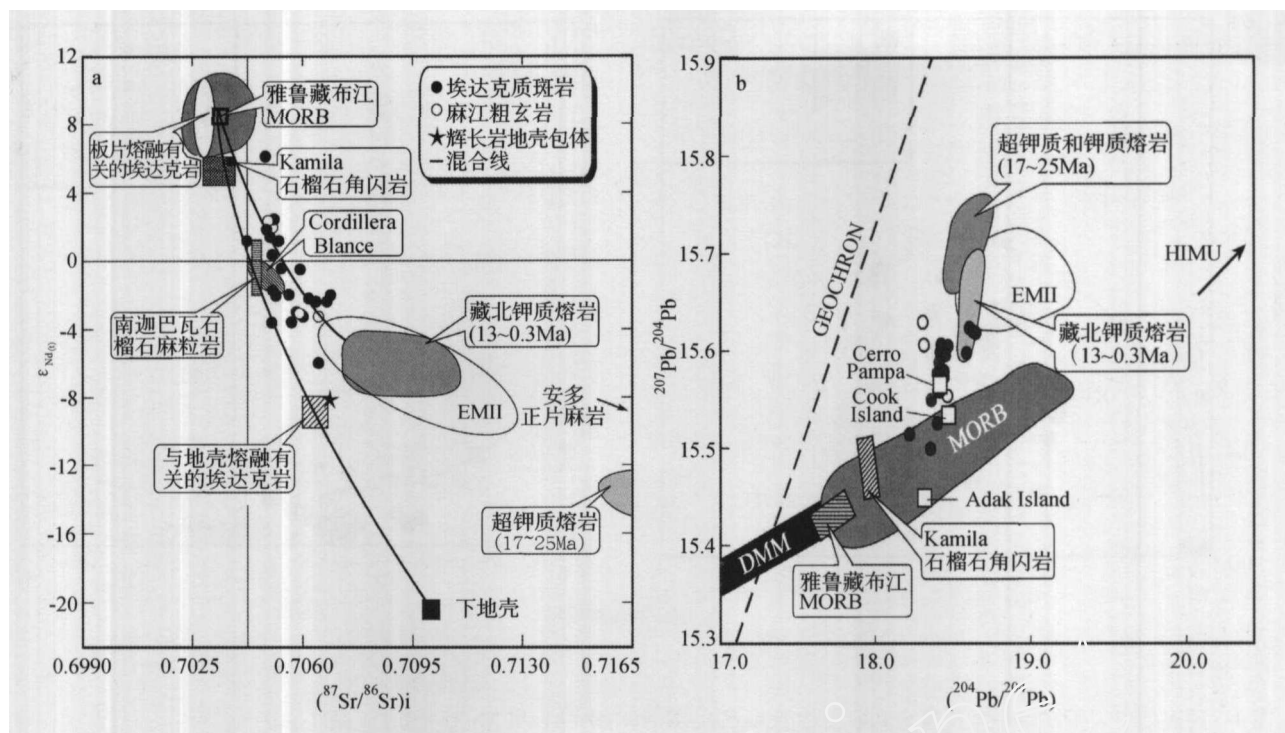


图3 冈底斯斑岩铜矿带中新世斑岩和喷出相的 $^{87}Sr/^{86}Sr - ^{143}Nd/^{144}Nd$ 图(a)和 $^{207}Pb/^{204}Pb - ^{206}Pb/^{204}Pb$ 图(b)。

西藏高原中新世钾质-超钾质熔岩资料来自 Turner *et al.* (1996) 和 Miller *et al.* (1999)。雅鲁藏布江 MORB 资料来自 Mahoney *et al.* (1998)。在图 3a, 藏南地下壳物质以西构造结 Kamila 石榴石角闪岩 (Khan *et al.*, 1996), 东构造结南迦巴瓦石榴石麻粒岩 (Ding *et al.*, 2001) 和超钾质熔岩中的辉长岩包体 (Miller *et al.*, 1999) 来代表。冈底斯斑岩多位于 MORB 与下地壳 ($^{87}Sr/^{86}Sr = 0.7100$; $^{143}Nd/^{144}Nd = 0.5115$) 混合线右侧。处于 MORB 与中新世超钾质熔岩 (或富集地幔 EM II) 混合线附近。来自中国东部 (宁镇) 埃达克质岩石 (张旗等, 2001; Xu *et al.*, 2002), Cordillera Blanca 埃达克岩 (Petford and Atherton, 1996) 以及西藏上地壳正片麻岩 (Miller *et al.*, 1999) 与冈底斯斑岩进行了比较。在图 3b, Adak 岛 (Kay, 1978), Cook 岛 (Stern *et al.*, 1996) 和 Cerro Pampa 埃达克岩 (Kay *et al.*, 1993) 与冈底斯斑岩进行了比较。DMM, HIMU 和 EMII 分别代表三种不同的地幔端元。

Fig. 3 $^{87}Sr/^{86}Sr$ versus $^{143}Nd/^{144}Nd$ diagram (a) and $^{207}Pb/^{204}Pb$ versus $^{206}Pb/^{204}Pb$ diagram (b) showing the isotopic signatures for the Miocene adakitic porphyries and related potassic calc-alkaline lavas in the southern Tibet

在冈底斯带, 埃达克斑岩至少有两种可能的源岩, 即加厚的玄武质下地壳和俯冲的洋壳板片。可以预测, 因印度和欧亚大陆碰撞而加厚 (~70 km) 的玄武质下地壳将从麻粒岩相转变为角闪榴辉岩或石榴石角闪岩相。实际上, 这些下地壳块体已经在西藏高原东西两个构造结被发现。在西构造结, 古新世榴辉岩及伴生的麻粒岩在巴基斯坦北部 Babusar Pass 地区和 Ladakh 的 Tso Moriri 等地被剥露出来 (Pagnant and Spencer, 1991; Le Fort *et al.*, 1997; Rolland *et al.*, 2002)。在冈底斯弧西延部分 - Kohistan 弧区, 岛弧基底的下地壳物质 - 含石榴石角闪岩也被剥露出来, 其 Nd, Sr 和 Pb 同位素组成类似于或十分接近于亏损地幔来源的 MORB (Khan *et al.*, 1996)。在东构造结南迦巴瓦地区, 石榴石麻粒岩和石榴石辉石岩也已被发现 (Ding *et al.*, 2001), 其中, 原岩为镁铁质的麻粒岩的 $^{144}Nd/^{143}Nd$ (0.5125 ~ 0.5127) 和 $^{87}Sr/^{86}Sr$ (0.7044 ~ 0.7047) (丁林, 私人通讯), 十分接近于 Cordillera Blanca 地区埃达克岩 (图 3a)。

除此而外, 在冈底斯西段, 代表下地壳物质的辉长岩包体也在中新世超钾质火山岩中被发现 (Miller *et al.*, 1999), 其 Nd-Sr 同位素特征可与中国东部埃达克岩对比 (张旗等, 2001; Xu *et al.*, 2002)。特别值得注意的是, 在 $\epsilon_{Nd}(t) - (^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 图上, 平行于印度河-雅鲁藏布缝合带断续出露的几个下地壳样品, 通常处在下地壳与 MORB 混合线上 (图 3a), 暗示不同部位的下地壳在构造演化历程中可能遭受了不同程度的软流圈物质加入和混合。假如藏南地下壳具有上述 $\epsilon_{Nd} - \epsilon_{Sr}$ 变化范围, 那么, 冈底斯埃达克质斑岩的 Nd-Sr 同位素组成则可以用下地壳物质部分熔融外加富集地幔注入或上地壳物质混染来解释。

为进一步判定富集地幔物质 (岩浆) 加入或上地壳物质混染的可能性, 冈底斯埃达克质斑岩数据投在 Rb/Sr-La/Ce 图和 Rb/Sr-Nb/U 图中 (图 4)。由于 Nb/U 和 La/Ce 在部分熔融和结晶分异过程中不发生分馏 (Hofmann *et al.*, 1986), 而 Rb/Sr 可敏感地反映地壳组分的影响, 因此, 冈底斯斑岩

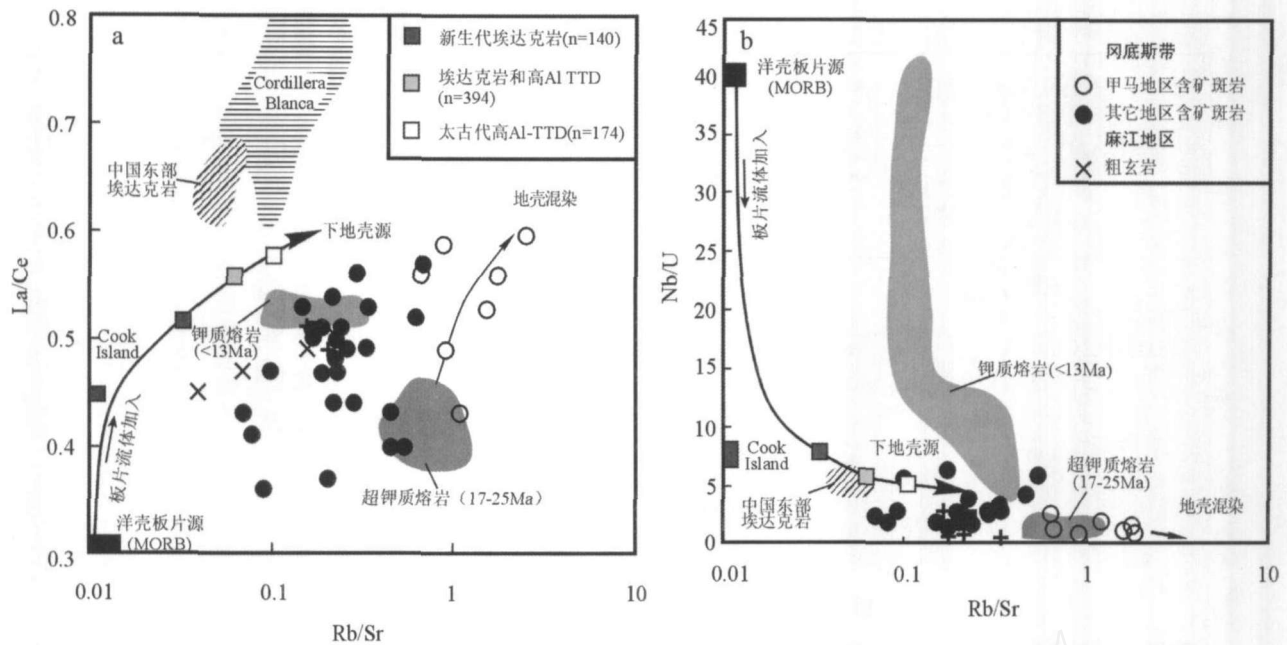


图4 冈底斯斑岩铜矿带中新世斑岩和喷出相的 $La/Ce - Rb/Sr$ 图 (a) 和 $Nb/U - Rb/Sr$ 图 (b)。

来自下地壳的埃达克质岩石以中国东部宁镇安基山岩石 (Xu *et al.*, 2002) 和 Cordillera Blanca 石英闪长岩和英闪岩 (Petford and Atherton, 1996) 为代表。来自洋壳板片熔融的埃达克岩以 Cook 岛埃达克岩 (Stern *et al.*, 1996) 为代表。环太平洋的新生代埃达克岩 (140 件样品), 埃达克岩和高-Al TTD (394 件样品) 和太古代高-Al TTD (174 件样品) 来自 Drummond and Defant (1996)。其中, 新生代埃达克岩以洋壳板片熔融为主, 太古代高-Al TTD 以下地壳熔融为主 (Drummond and Defant, 1996)。

Fig. 4 La/Ce versus Rb/Sr (a) and Nb/U versus Rb/Sr diagram (b) for adakitic porphyries and related extrusive rocks in Gangdese. Adakitic rocks

向低 Nb/U (La/Ce) 和高 Rb/Sr 方向偏移, 则暗示了岩浆演化过程中曾有上地壳和/或富集地幔组分的加入。由图 4 可见, 冈底斯斑岩可明显分为两组, 一组以甲马斑岩为主, 以高 K_2O (4.24% ~ 8.56%) 和高 ($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i (0.7062 ~ 0.7069) 为特征, 其 Rb/Sr 比值 > 0.56 , 反映了上地壳物质混染 (图 4)。另一组为大部分含矿斑岩, 其 Rb/Sr 比值 < 0.56 , 变化于下地壳来源的埃达克岩与中新世超钾质熔岩之间, 反映了富集地幔源物质的加入。这种富集地幔源物质-中新世超钾质岩浆, 与初始的埃达克质熔体混合, 不仅可以解释冈底斯斑岩的高 $Mg^{\#}$ 值和高 K_2O 含量, 而且可以解释斑岩的 $Sr-Nd-Pb$ 同位素变化 (图 3)。

冈底斯埃达克质斑岩的另外一个可能的源岩, 是白垩纪时期向北俯冲的已变质成榴辉岩的新特提斯洋壳板片, 以雅鲁藏布江 MORB 为代表。正如侯增谦等 (2003c) 和 Gao *et al.* (2003) 所建议, 由雅鲁藏布江 MORB 部分熔融产生的埃达克质初始熔体与来自富集地幔的钾质熔浆发生混合, 也可以解释冈底斯斑岩的地球化学特征。地球物理资料揭示, 俯冲的部分洋壳板片残留在中地壳 30km 深处 (Makovsky *et al.*, 1999), 但其深度太浅, 显然不能成为冈底斯斑岩的理想源岩。大部分洋壳板片可能已俯冲于地幔岩石圈中, 但其究竟是停留于下地壳底部还是俯冲于地幔深处, 尚无地球

物理资料显示。如果其停留于下地壳底部, 则可构成理想的源岩。出现于中新世的软流圈物质上涌, 则可为其提供发生部分熔融的热能。总之, 尽管最新的地质观察和地球化学资料更倾向于下地壳部分熔融成因, 但目前还没有足够的证据排除俯冲洋壳板片部分熔融的可能性。

7 构造控制模式

7.1 深部构造控制

冈底斯含铜斑岩及共存的新世钾质熔岩反映了一个新的重要岩浆事件, 它明显不同于在 40Ma 以前已经停止的由新特提斯洋俯冲引起的岛弧岩浆活动。冈底斯铜矿带的空间展布和成矿年龄表明, 斑岩铜矿产出于冈底斯快速隆升后的后碰撞伸展环境。地壳伸展变形与钾质岩浆活动同时出现, 标志着藏南构造在 17 ~ 12 Ma 时期发生的重大变化。正是由于这种动力学背景的重大变化, 或者导致了被加厚的玄武质下地壳部分熔融, 或者诱发了俯冲于大陆岩石圈内的洋壳板片的部分熔融。地壳加厚过程产生的放射成因热能有可能是形成埃达克质岩浆的主要热源, 但这种热能只能出现于加厚岩石圈的热时间常数 (240Ma) 时间尺度上 (Turner *et al.*, 1996)。同时, 岩石圈加厚和小规模伸

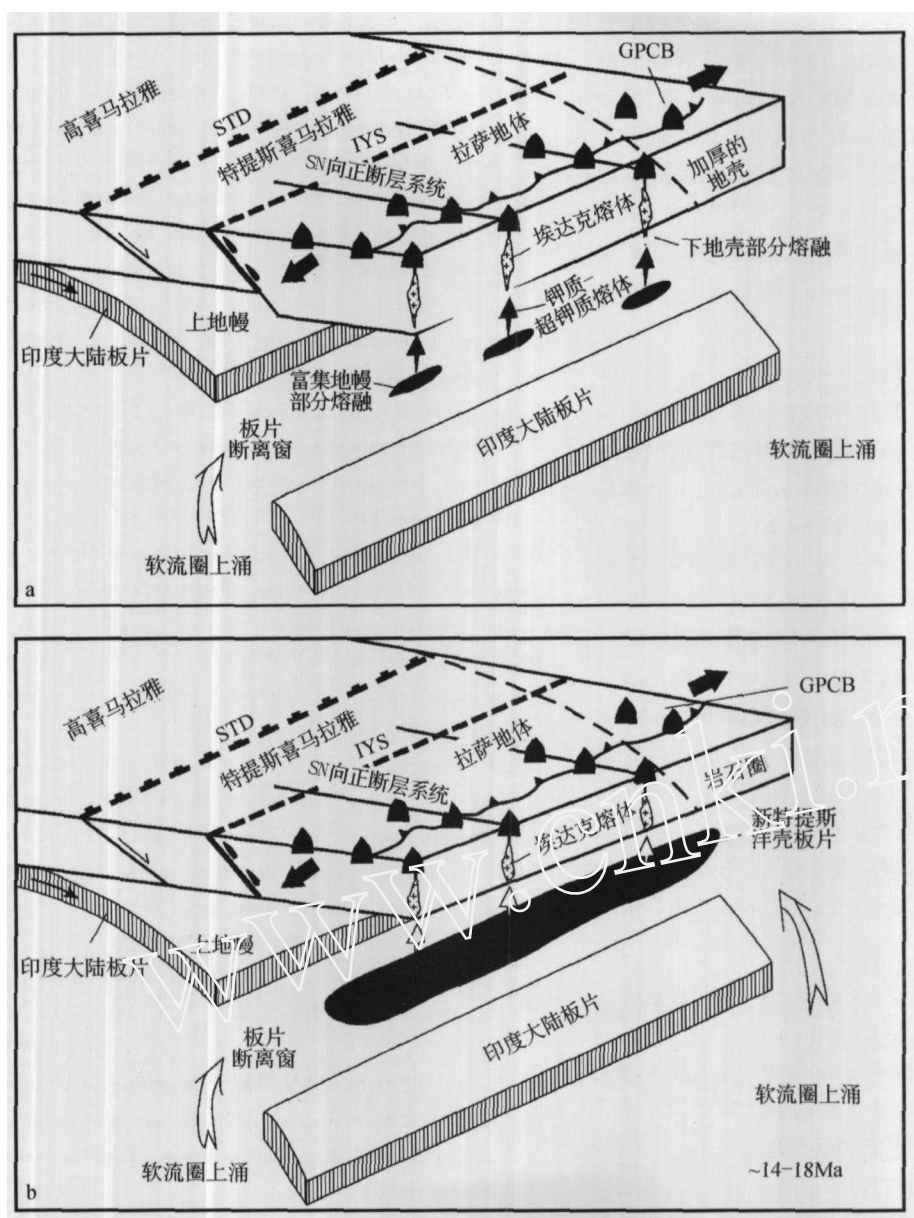


图5 冈底斯带含铜埃达克质岩浆形成的两种可能的构造模式

图5a 强调向北俯冲的印度板片自25Ma以来发生断离作用,诱发软流圈上涌,导致富集地幔熔融,产生钾质-超钾质熔体,后者上侵至被碰撞加厚的下地壳底部,引发下地壳物质熔融,产生埃达克熔浆。同时,软流圈上涌侵蚀,导致岩石圈地幔减薄和拆沉,引起高原EW向伸展和SN向正断层系统形成,从而控制埃达克熔浆空间就位。图5b 强调印度板片断离引发软流圈上涌,导致白垩纪俯冲的变质成榴辉岩的洋壳残片部分熔融,形成埃达克熔浆,后者与钾质-超钾质熔体混合,产生含矿斑岩

Fig. 5 Two possible tectonic models illustrating the relationship of breakoff of the Indian continental slab since 25Ma and post-collisional extension with Cu-bearing adakitic magmatism in south Tibet

展也可以排除减压熔融的可能性,因为压力的降低只能导致榴辉岩向麻粒岩相转变(Ding *et al.*, 2001)。诱发下地壳或俯冲板片熔融的最可能热来自软流圈物质的上涌。后者或者通过岩石圈地幔的对流减薄(Houseman *et al.*, 1981; Turner *et al.*, 1993),或者通过俯冲板片断离(slab breakoff)窗来实现(Maheo *et al.*, 1999)和 Maheo *et al.* (2002)用板片断离来解释藏南中新世钾质-超钾质火山

岩带的发育;Turner *et al.* (1993)用岩石圈地幔的对流减薄来解释13 Ma以来喷发的,遍布高原腹地的小体积钾质熔岩分布和高原快速隆升。我们认为,冈底斯含铜斑岩带及共存的中新世超钾质火山岩带仅限于藏南地区,构成了一条长达数千公里的狭窄的“热异常带”,用板片断离作用似乎更好解释。印度大陆板块在~25 Ma开始出现的板片断离可能导致了中新世(25~17Ma)超钾质岩浆发育(Maheo *et*

al., 2002), 后者向上运移和底侵可能诱发了下地壳的部分熔融, 产生埃达克岩浆(17~12Ma)。同时, 断离板块的继续下沉, 可能促进了软流圈的大规模上涌和向北扩展, 导致岩石圈地幔减薄, 并诱发岩浆熔融和小体积钾质岩浆喷发(13~0.3Ma)。由于埃达克岩浆源区含水, 并有钾质基性岩浆混入, 因此, 斑岩岩浆富含金属元素和S, 并处于高氧化态。在结晶分异作用过程中, 流体可达到蒸汽饱和, 成矿金属物质得以浓集(Silliton and Thompson, 1998)。

7.2 区域构造控制

在大陆边缘和岛弧环境, 垂直和/或平行弧的走滑断裂控制着斑岩带及其矿床。在西藏碰撞造山带, 东西向的逆冲带和南北向的正断层交汇处为埃达克质岩浆迅速上升就位通道, 并成为含矿流体释放的空间(图5a,b)。

正断层开始形成时间, 藏南为14Ma到8Ma之间(Coleman and Hodges, 1995), 藏北大约在13.5Ma左右(Bllsnluk et al., 2001)。冈底斯带中SN向基性岩墙在13~18Ma侵位, 推测藏南约在18Ma左右开始伸展(Williams et al., 2001)。冈底斯铜矿带含铜斑岩的空间分布以及15Ma左右岩体侵位高峰预示, 这些正断层为埃达克质熔体运移和浅层次就位提供了通道和场所。东西向伸展作用和正断层的活动使得应力突然释放, 引发岩浆房去气作用, 形成大量的富金属的挥发份并使其上升, 形成含矿的岩浆热液系统。

8 结论

藏南冈底斯斑岩铜矿带时空分布表明, 在大陆碰撞造山带同样可以形成大型斑岩铜矿。这些铜矿床形成于造山后伸展环境, 受垂直造山带的正断层系统控制。

形成大型矿床的斑岩为钾玄岩和钾质钙碱性岩, 其地球化学特征表明它们具有埃达克岩的岩浆亲和性。岩浆可能起源于因碰撞而加厚的藏南下地壳, 源区熔融可归因于高热的软流圈上涌, 后者或者通过印度大陆板块的断离作用, 或者通过岩石圈地幔减薄来实现。

致谢 本研究受国家重点基础研究发展规划项目“印度-亚洲大陆主碰撞带成矿作用”(项目编号:2002CB412600)资助。研究过程中得到张旗研究员指导, 与许继锋研究员的讨论也使作者受益匪浅, 在此一并表示衷心感谢。

References

Bllsnluk P M, Hacker B, Glodny J, Ratschbacher L, Bill S, Wu Z-H, McWilliams M O, Calvert A. 2001. Normal faulting in central Tibet since at least 13.5 Ma ago. *Nature*, 412: 628-632
Castillo R P, Pringle M S, Carlson R W. 1994. East Mariana basin

tholeiites: Cretaceous intraplate basalts or rift basalts related to the Ontong Java plume? *Earth Planet. Sci. Lett.*, 123: 139-154
Chen W-J, Li Q, Hao J. 1999. Postcrystallization thermal evolution history of Gangdese batholithic zone and its tectonic implication. *Science in China*, 42: 37-44
Coleman M, Hodges K. 1995. Evidence for Tibetan Plateau uplift before 14 Ma ago from a new minimum age for east-west extension. *Nature*, 374: 49-52
Copeland P, Harrison Y M, Yun P. 1995. Thermal evolution of the Gangdese batholith, Southern Tibet: A history of episodic unroofing. *Tectonics*, 14: 223-236
Coulon C, Maluski H, Bollinger C, Wang S. 1986. Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet: $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ dating, petrological characteristics and geodynamic significance. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 79: 281-302
Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662-665
Defant M J, Drummond M S. 1993. Mount St. Helens: potential example of partial melting of subducted lithosphere in a volcanic arc. *Geology*, 21: 547-550
Ding L, Zhong D-L, Yin A, Harrison T M. 2001. Cenozoic structural and metamorphic evolution of the eastern Himalayan syntaxis (Nainche Barwa). *Earth Planet. Sci. Lett.*, 192: 423-438
Drummond M S, Defant M J, Kepezhinskas P K. 1996. Petrogenesis of slab-derived trondhjemite-tonalite-dacite/adakite magmas. *Trans. R. Soc. Edinb. Earth Sci.*, 87: 205-215
Durr S B. 1996. Provenance of Xizang fore-arc basin clastic rocks (Cretaceous, south Tibet). *Geol. Soc. Am. Bull.*, 108: 669-684
Gao Y-F, Hou Z-Q, Wei R-H. 2003. Post-collisional adakitic porphyries in Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic constraints on partial melting of oceanic lithosphere and crust-mantle interaction. *Sinica Geologica Acta*, 77: No. 2
Gutscher M A, Maury R, Eissen J P, Bourdon E. 2000. Can slab melting be caused by flat subduction? *Geology*, 28: 535-538
Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, Lovera O M. 1995. Activation of the Nyainqentanghla shear zone: implication for uplift of the southern Tibetan Plateau. *Tectonics*, 14: 658-676
Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, Yin A. 1992. Raising Tibet. *Science*, 255: 1663-1670
Hofmann A W, Jochum K P, Seufert M, White W M. 1986. Nd and Pb in oceanic basalts: new constraints on mantle evolution. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 79: 33-45
Hou Z-Q, Gao Y-F, Qu X-M, Mo X-X, Zhao Z-D. 2003d. Origin of adakitic rocks generated during the mid-Miocene east-west extension in south Tibet. *Earth Planet. Sci. Lett.*, (in press).
Hou Z-Q, Ma H-W, Zaw K, Zhang Y-Q. 2003a. The Himalayan Yulong porphyry copper belt: Product of large-scale strike-slip faulting in eastern Tibet. *Economic Geology*, 98: 125-145.
Hou Z-Q, Mo X-X, Gao Y-F, Qu X-M, Meng X-J. 2003c. Adakite, a

- possible host rock for porphyry copper deposits: case studies of porphyry copper belts on Tibetan Plateau and in northern Chile. *Mineral Deposits*, 22: 1–12 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z-Q, Qu X-M, Wang S-X, Gao Y-F. 2003b. Re-Os age for molybdenite from the Gangdese porphyry copper belt on Tibetan plateau: Duration of the Cu mineralization and implication for geodynamic setting. *Science in China*, 33: 609–618 (in Chinese).
- Houseman G C, McKenzie D P, Molnar P. 1981. Convective thinning of a thickened boundary layer and its relevance for the thermal evolution of continent convergent belts, *Journal of Geophysical Research*, 86: 6115–6132.
- Kay R W J. 1978. Aleutian magnesium andesites: melts from subducted Pacific oceanic crust. *Jour. Volcan. Geotherm. Res.*, 4: 117–132.
- Kay S M, Mpodozis C, Coira B. 1999. Neogene magmatism, tectonism, and mineral deposits of central Andes (22° to 33° S Latitude). *Geology and Ore Deposits of the Central Andes* (ed. By Skinner, B. J.), Society of Economic Geologists Special Publication 7: 27–59.
- Kay S M, Ramos V A, Marquez M. 1993. Evidence in Cerro Pampa volcanic rocks for slab – melting prior to ridge – trench collision in Southern South America. *Jour. Geol.*, 101: 703–714.
- Kelemen B P. 1995. Genesis of high Mg# andesites and the continental crust. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 120: 1–19.
- Kerrick R, Goldfarb R, Groves D, Garwin S. 2000. The characteristics, origins, and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces. *Science in China*, 43: 1–68.
- Khan T, Khan M A, Jari M Q, Naseem M. 1996. Back-arc basin assemblages in Kohistan, Northern Pakistan. *Geodin. Acta*, 9: 30–40.
- Kirkham R V. 1998. Tectonic and structural features of arc deposits: Metallogeny of volcanic arcs. *British Columbia Geological Survey*, B1–45.
- Le Fort P, Guillot S, Pecher, A H P. 1997. Metamorphic belt along the Indus suture zone of NW Himalaya: new discoveries and significance. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 325: 773–778.
- Maheo G., Guillot S. Blichert-Toft J. Rolland Y, Pecher A. 2002. A slab breakoff model for the Neogene thermal evolution of Southern Karakorum and South Tibet. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 195: 45–58.
- Mahoney J J, Frei R, Tejada M L G., Mo X-X, Leat P T. 1998. Tracing the Indian ocean mantle domain through time: Isotopic results from old west Indian, east Tethyan and south Pacific seafloor. *J. Petrol.*, 39: 1285–1306.
- Makovsky Y, Klemper S L, Ratschbacher L, Alsdorf D. 1999. Midcrustal reflector on INDEPTH wide – angle profiles – an ophiolitic slab beneath the India-Asia suture in southern Tibet. *Tectonics*, 18: 793–808.
- Miller C, Schuster R, Klotzli U, Frank W, Purtscher F. 1999. Post – collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis. *J. petrol.*, 40: 1399–1424.
- Minster J F, Ricard L P, Allegre C J. 1979. ⁸⁷Re-⁸⁷Sr chronology of enstatite meteorites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 44: 420–440.
- Muir R G, Weaver S D, Bradshaw J D, Eby G N, A. Evans J. 1995. Geochemistry of the Cretaceous Separation Point batholiths, New Zealand: granitoid magmas formed by melting of mafic lithosphere. *Geological Society Journal*, 152: 689–701.
- Murphy M A, Yin A, Harrison T M, Durr S B, Chen Z, Ryerson F J, Kidd W S F, Wang X, Zhou X. 1997. Significant crustal shortening in south-central Tibet prior to the Indo-Asian collision. *Geology*, 25: 719–722.
- Pagnant U, Spencer D A. 1991. First record of eclogites from the Himalayan belt, Kaghan valley, Northern Pakistan. *Eur. J. Mineral.*, 3: 613–618.
- Patriat P, Achache J. 1984. India – Eurasian collision chronology has implications for crustal shortening and driving mechanism of plates. *Nature*, 311: 615–621.
- Peacock S M, Rusher T, Thompson A B. 1994. Partial melting of subducting oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 121: 224–227.
- Pearce J A, Norry M J. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 69: 33–47.
- Petford N, Atherton M. 1996. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: the Cordillera Blanca batholith, Peru. *Journ. Petrol.*, 37: 1491–1521.
- Qu X-M, Hou Z-Q, Huang W. 2001. Is the Gangdese porphyry copper belt the "Yulong porphyry copper belt in Tibetan plateau? *Mineral Deposits*, 20: 355–366 (in Chinese with English abstract).
- Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalts at 8–32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Jour. Petrol.*, 36: 891–931.
- Richards J P, Boyce A J, Pringle M S. 2001. Geologic evolution of the Escondida area, northern Chile: a model for spatial and temporal location of porphyry Cu mineralization. *Economic Geology*, 96: 271–306.
- Rolland Y, Picard C, Pecher A, Lapiere H, Bosch D, Keller F. 2002. The Cretaceous Ladakh of NW Himalaya – slab melting and melt-mantle interacting during fast northwestern drift of Indian Plate. *Chemical Geology*, 182: 139–178.
- Sajona F G, Maury R C, Pubellier M. 2000. Magmatic source enrichment by slab-derived melts in a young post-collision setting, central Mindanao (Philippines). *Lithos*, 54: 173–206.
- Schares E, Xu R-H, Allegre C J. 1984. U-Pb geochronology of the Gangdese (Transhimalaya) plutonism in the Lhasa-Xizang region, Tibet. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 69: 311–320.
- Sillitoe R H. 1993. Gold-rich porphyry copper deposits: geological model and exploration implication. *Mineral Deposit Modeling, Geological Association of Canada Special Paper 40*: 465–478.
- Sillitoe R. H., Thompson, J. F. H., 1998, Intrusion – related vein gold deposits: type, tectonic – magmatic settings and difficulties of distinction from orogenic gold deposits; *Resource Geology*, 48: 237.

-252

- Skewes M A, Stern C R. 1995. Genesis of the granitoid late Miocene to Pliocene copper deposits of central Chile in the context of Andean magmatic and tectonic evolution. *International Geology Review*, 37: 893
- Stern C R, Kilian R. 1996. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone. *Contrib. Miner. Petrol.*, 123: 263 - 281
- Tatsumi Y. 1986. Chemical characteristics of fluid phase released from a subduction lithosphere and origin of arc magma: evidence from high-pressure experiments and natural rocks. *Jour. Volcano. Geotherm. Res.*, 29: 293 - 309
- Turner S, Aranud N, Liu J, Rogers N, Hawkesworth G. J, Harris N, Kelley S, van Calsteren P V, Deng W. 1996. Post-collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan Plateau: implication for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts. *Jour. Petrol.*, 37: 45 - 71
- Turner S, Hawkesworth G., Liu J, Rogers N, Kelley S, Calsteren P V. 1993. Timing of Tibetan uplift constrained by analysis of volcanic rocks. *Nature*, 364: 50 - 54
- Williams H, Turner S, Kelley S, Harris N. 2001. Age and composition of dikes in Southern Tibet: new constraints on the timing of east-west extension and its relationship to post-collisional volcanism. *Geology*, 29: 339 - 342
- Xu J F, Shinjo R, Defant M J, Wang Q, Papp R P. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: partial melting of delaminated lower continental crust? *Geology*, 30: 1111 - 1114
- Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan - Tibetan orogen. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 28: 211 - 280
- Zhang Q, Wang Y, Wang Y-L. 2001. 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: 505 - 513
- Zhao, W. J., Mechie, J., Meintser, R., Ratschbacher, L., Steentoft, H., Husen, S., Brauner, H. J., Jiang D., Frisch, W

附中文参考文献

- 侯增谦, 曲晓明, 王淑贤等. 2003b. 西藏高原冈底斯斑岩铜矿带辉钼矿 Re - Os 年龄: 成矿作用时限与动力学背景应用. *中国学科*, 33: 609 - 618
- 侯增谦, 莫宣学, 高永丰等. 2003c. 埃达克岩: 斑岩铜矿的一种可能的重要含矿母岩——以西藏和智利斑岩铜矿为例. *矿床地质*, 22: 1 - 12
- 曲晓明, 侯增谦, 黄卫. 2001. 冈底斯斑岩铜矿成矿带: 西藏第二条玉龙铜矿带? *矿床地质*, 20: 355 - 366
- 张旗, 王焰, 王元龙. 2001. 燕山期中国东部高原下地壳组成初探: 埃达克岩同位素制约. *岩石学报*, 17: 504 - 513