

斑岩 Cu-Mo-Au 矿床：新认识与新进展

侯增谦

(中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要 斑岩型矿床作为一种最重要的铜钼和铜金矿床类型一直得到人们的普遍重视,近些年来又取得了重要研究进展,主要体现在5个方面:①岛弧和陆缘弧是斑岩型矿床产出的重要环境,但大陆碰撞造山带也具有产出斑岩型矿床的巨大潜力。按矿床产出的构造环境,可以分为弧造山型斑岩矿床和碰撞造山型斑岩矿床;②弧造山型含矿斑岩主要为钙碱性和高钾钙碱性,而碰撞造山型含矿斑岩则主要为高钾钙碱性和橄榄安粗质(shoshonitic)。两种环境的含矿斑岩多具有埃达克岩(adakite)岩浆亲合性,但前者主要来源于俯冲的大洋板片,后者主要来源于碰撞加厚的下地壳。大洋板片的部分熔融缘于俯冲角度的平缓化,而加厚下地壳的熔融起因于俯冲大陆板片的断离(slab breakoff);③在弧造山环境,大洋俯冲板片的膝折(kink)或撕裂(slab tear)不仅导致俯冲角度变缓,而且引起弧地壳耦合变形,产生切弧断裂,控制斑岩铜系统的时空分布。俯冲板片撕裂引发软流圈上涌,诱发大洋板片熔融,产生含矿岩浆;④在碰撞造山环境,大陆俯冲板片的裂离导致软流圈上涌,向下地壳注入新生物质,并诱发下地壳物质熔融,产生含矿岩浆。碰撞后地壳伸展形成横切碰撞带的正断层系统,为斑岩侵位提供运移通道,并导致岩浆流体大量分凝和铜钼金淀积。不论是斜向俯冲的弧造山带,还是斜交碰撞带的构造调节带,常常发育一系列的走滑断裂带和伴生的拉分盆地,也是含矿岩浆浅成侵位和分凝流体排泄运移的重要输导系统;⑤在许多斑岩成矿带或矿集区,斑岩型矿床的热液蚀变系统常出现套合作用(telescoping),早形成的斑岩Cu-Mo系统常被浅成低温热液Cu-Au系统叠加,或者形成两个共存的独立矿床,或者构成一个巨型高品位矿床。热液套合和矿化叠加可能与成矿后或成矿过程中的区域快速隆升有关。

关键词 斑岩型矿床 埃达克岩 成矿叠加 构造控制 成矿环境

中图分类号:P618.2 文献标识码:A 文章编号:1005-2321(2004)01-0131-14

斑岩型矿床作为一种最重要的铜钼和铜金矿床类型,为世界提供了50%以上的金属铜资源^[1]。鉴于斑岩型矿床在科学上和经济上的重要性,几十年来,人们一直对其倾注了巨大的热情,并取得了斐然成绩。以著名的岛弧-斑岩成矿模型为核心的成矿理论不断完善,在其理论指导下的找矿实践不断取得重大突破。纵观斑岩型矿床的研究历史,可概略地归纳为3个阶段:①20世纪七八十年代,注重于矿床特征、蚀变系统和矿床成因研究;②20世纪90年代,聚焦于成矿环境和构造控制研究;③本世纪初,更加关注于成矿地球动力学背景研究。最近十

多年来,在斑岩型矿床的斑岩起源、热液系统、成矿系统、构造控制和动力学背景等研究方面,均取得了诸多新认识和新进展,大大地拓展了人们对斑岩成矿系统的理解和认知,特别是近年来的新观察与新发现,更加激起了人们的浓厚兴趣,并为深入研究斑岩型矿床注入了新的活力。本文主要就近年来的最新进展予以概述。

1 构造背景与成矿环境

众所周知,斑岩型矿床主要产于大洋板片俯冲产生的岛弧和陆缘弧环境。陆缘弧环境的经典成矿省包括安第斯中部(如阿根廷 Bajo de la Alumbrera, Marte 等矿床)^[2,3],美国西部(如 Bingham, Dos Pobers 矿床)^[4,5]和巴布亚新几内亚-伊利安爪哇(如 Grasberg, Oki Tedi, Freida River 矿床等)^[6~8],岛

收稿日期:2004-03-04;修订日期:2004-03-09

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412600),国家自然科学基金重点项目(40234051)

作者简介:侯增谦(1961—),男,博士,研究员,博士生导师,现从事大陆成矿作用研究。

弧环境的斑岩型矿床则环绕西太平洋广泛分布,如印尼的 Batu Hijau 和菲律宾的 Lepanto-FSE 等^[9,10]。这些成矿省和巨型矿床通常形成于第三纪,成矿年龄介于 1.2 ~ 38 Ma 之间,含矿斑岩多属钙碱性(岛弧)和高钾钙碱性(陆缘弧),矿带规模均为世界级,单个矿床的 Cu 储量多在 1 000 万 t 以上,品位变化于 0.46% ~ 1.3% 之间, Au 储量在 300 t 以上(300 ~ 1 550 t),品位介于 0.32 ~ 1.42 g/t 之间^[11]。这些巨型矿床的吨位-品位模式表明,岛弧和陆缘弧环境具有产出斑岩型矿床的巨大成矿潜力。

显然,不是所有的岛弧和陆缘弧环境都产出斑岩型矿床。有火山成因块状硫化物矿床(VMS)产出的岛弧环境,通常不发育斑岩型矿床。例如日本第三纪岛弧,大量发育黑矿型(Kuroko-type)块状硫化物矿床^[12],但却一直没发现工业规模的斑岩型矿床。这种矿床的非共存性暗示,岛弧虽为形成金属矿床的重要环境,但其基本类型和发育特征不同,产出矿床的类型及潜力也不同。Uyeda 和 Kanamori (1979)曾对此给予这样的解释,即以发育弧间裂谷为标志的张性弧,产出 VMS 矿床,以发育中酸性火山-岩浆岩套为特征的压性弧,产出斑岩型矿床^[13],这种推测也被古岛弧研究所证实^[14]。导致岛弧区应力场巨大差异的原因可能应归结于大洋板片的俯冲角度。高角度俯冲产生张性弧,以马里亚纳弧为代表,缓角度俯冲产生压性弧,以安第斯弧为极端类型代表^[13]。

最近研究证实,大陆碰撞造山带也是斑岩型矿床产出的重要环境,藏东玉龙斑岩铜矿带和冈底斯斑岩铜矿带是其典型代表^[15,16]。中国学者为识别这一重要的成矿环境作出了贡献。这两大成矿带均产于印度-亚洲大陆碰撞形成的喜马拉雅-西藏造山带,但形成于碰撞造山的不同阶段和不同环境。藏东玉龙斑岩铜矿带长约 300 km,宽约 15 ~ 30 km,由 4 个大型铜矿和众多含矿斑岩体构成,金属铜储量在 1 000 万 t 以上,其中,玉龙铜矿铜储量在 628 万 t,伴生 Au 约 100 t, Cu 品位 0.99%, Au 品位 0.35 g/t,具有世界级规模^[17,18]。成矿带分布于碰撞造山带东缘的构造调节带(转换带),空间展布呈 NNW 向,与印-亚大陆主碰撞方向斜交,受 NNW 向大规模走滑断裂带控制。斑岩带岩浆活动有 3 个高峰期,分别为 52 Ma, 40 Ma, 33 Ma^[15],成矿年龄介于 40 ~ 35 Ma^[19]。斑岩成矿系统发育于大陆强烈碰撞后的应力释放期或压扭向张扭转换期(图 1a)^[19]。

冈底斯斑岩铜矿带是近年突破的又一成矿带。正在进行的矿产评价和研究表明,成矿带东西延伸约 350 km,南北宽约 80 km,由几个大型铜矿和一系列小型矿床矿点构成,金属铜资源量在 1 000 万 t 以上,具有世界级矿带的潜力远景^[20]。该成矿带产于近 EW 向展布的冈底斯花岗岩基内,平行于印-亚大陆主碰撞带方向,受近 NS 向延伸的正断层系统和 EW 走向的逆冲带控制。冈底斯花岗岩基成岩年龄介于 120 ~ 30 Ma 间^[21],高峰期分别为 50 ~ 55 Ma 和 30 ~ 24 Ma,分别与印-亚大陆强烈碰撞期和逆冲带活动期吻合(图 1b)。含矿斑岩岩浆年龄介于 13 ~ 17 Ma^[22],成矿年龄集中于 14 ~ 16 Ma^[23~25],分别与中新世地壳东西向伸展(13 ~ 18 Ma)^[26]和相伴产生的正断层系统发育时限(< 14 Ma)^[27,28]相吻合,证明斑岩铜矿系统发育于碰撞后地壳伸展环境(图 1b)。

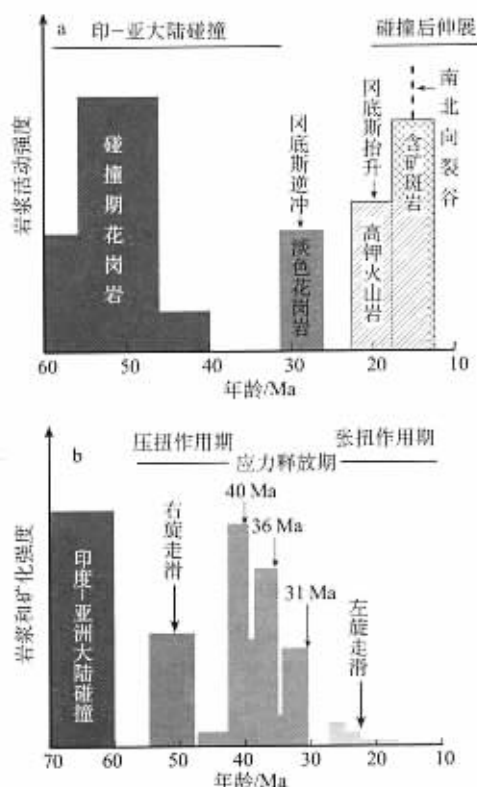


图1 青藏高原碰撞造山带构造-岩浆事件与斑岩成矿作用的关系
(据参考文献[16]和[19])

Fig. 1 The sketch illustrating the relationship between tectono-magmatic events and porphyry Cu mineralization in the Tibetan collisional orogen

a—冈底斯带岩浆事件年代格架及其与斑岩铜矿关系;b—高原东缘构造-岩浆事件的年代格架及其与玉龙斑岩铜矿带的关系

总之,斑岩型矿床既可以产出于弧造山环境,也

可形成于碰撞造山环境,笔者将前者称为弧造山型斑岩矿床,后者称为碰撞造山型斑岩矿床。两者既有广泛的类似性,又有明显的差异性(类似著述很多,在此不再赘述)。

2 含矿斑岩与埃达克岩

大量研究表明,含矿斑岩通常侵位较浅,一般 1~4 km,规模不大,直径一般 <2 km,具有多期次侵位特点,不仅成矿前、成矿期、成矿后的侵位相空间共存,而且最晚期隐爆角砾岩筒常相伴发育。主要岩相从中性的闪长质到酸性的花岗质斑岩,但岛弧环境斑岩成分偏中性,而大陆环境(陆缘弧和碰撞带)斑岩偏酸性,反映穿过厚陆壳的长英质岩浆经历更充分的结晶分异作用。整体上,岛弧环境的含矿斑岩通常是钙碱性的,而大陆环境的含矿斑岩多为高钾钙碱性,部分为钾质碱性和橄榄安粗质(shoshonitic)^[2~10],这种规律性或者暗示含矿斑岩的岩浆源区存在差异,或者反映加厚陆壳对原始岩浆成分产生混染。

关于斑岩岩浆的起源演化,过去通常认为,含矿岩浆起源于被俯冲板片流体交代的地幔楔形区,岩浆熔体分凝上升,并在相对封闭体系发生结晶分异和/或地壳混染,形成含矿斑岩,发育岩浆-热液成矿系统。然而,最近的研究却在悄悄地改变着这一固有观点,因为不断增多的证据表明,含矿斑岩并不具有典型的弧火山岩特征,相反,它们多具有埃达克岩(adakite)岩浆亲合性,因此,许多研究者推测并强调:adakite 与斑岩 Cu-Mo-Au 矿床存在密切的成生联系^[29~37]。

埃达克岩,因埃达克岛而得名,是一种产于岛弧环境的、起源于大洋俯冲板片的低 K、高 Na、高 Al ($u(\text{Al}_2\text{O}_3) > 15\%$, $u(\text{SiO}_2) = 70\%$)、高 Sr ($\geq 400 \times 10^{-6}$),亏损 Y ($\leq 18 \times 10^{-6}$)和 HREE 的中酸性岩^[38]。变质为角闪岩/榴辉岩相的玄武质(MORB)岩石通常被认为是形成埃达克岩的理想岩浆源岩,因为在 >40 km 压力条件下相变为角闪岩/角闪榴辉岩/榴辉岩的玄武质岩石,在部分熔融过程中,石榴石和金红石将作为残留相出现^[39],其与平衡的岩浆熔体将具有较低的 HREE 和 Y 含量,相对亏损 HFSE (Nb, Ta, Ti, P),相对富集 Sr,从而在 Sr/Y-Y 图中明显区分于弧火山岩岩浆^[38]。这些埃达克岩多数产于岛弧环境并与弧火山岩伴生的重要事实使

人相信,埃达克岩是俯冲到一定深度的洋壳板片(MORB)发生部分熔融的产物^[30,38,40,41]。最近研究表明,在安第斯陆缘弧(智利北部),产出巨型斑岩铜矿的钙碱性含矿斑岩也具有埃达克岩岩浆亲合性。这些晚中新世—早上新世斑岩的 Sr 变化于 $(230 \sim 1\,950) \times 10^{-6}$, Y 变化于 $(5 \sim 16) \times 10^{-6}$ 间, Sr/Y 比值变化于 20~130 之间,处于埃达克岩区内,显示典型的埃达克岩地球化学特征^[33]。根据区域构造分析, Oyarzun 等(2001)提出,大洋板片俯冲角度变缓是形成这些埃达克质含矿岩浆的主要动力学机制^[33]。

类似埃达克岩成分的中酸性岩石最近也在大陆环境发现,秘鲁 Cordillera Blanca 岩基和我国东部安基山的中酸性侵入岩就是典型实例。前者被认为来源于底侵成因的玄武质成分下地壳^[42],后者被解释为拆沉的玄武质下地壳的部分熔融^[43]。张旗等(2003)和王强等(2003)通过详细的岩石地球化学研究也提出,在我国东部长江中下游成矿带,与 Cu-Au 矿伴生的燕山期中酸性侵入岩具有埃达克岩特征,岩浆起源于中国东部曾经加厚的下地壳^[36,37]。

最近,我们研究发现,青藏高原的两条斑岩铜矿带的喜山期含矿斑岩也具有埃达克岩岩浆亲合性^[22,23,44,45]。然而,这些岩石相对富钾(K_2O : 3.02%~8.56%),属高钾钙碱性系列和钾玄岩系列,相对富镁(MgO : 0.56%~1.43%),其 $\text{Mg}^\#$ 值变化于 36~72 之间,有别于大洋板片熔融形成的典型 Na 质埃达克岩,因为正常 MORB 的部分熔融,只能形成钠质的埃达克质熔体,且 $\text{Mg}^\#$ 值多小于 40。此外,这些含矿斑岩还以较高的 $N_i(^{87}\text{Sr})/N_i(^{86}\text{Sr})$ (0.704 9~0.707 9)和低 $N(^{143}\text{Nd})/N(^{144}\text{Nd})$ 值 ($\epsilon(\text{Nd}_t)$: -6.18~+5.52)^[22],区别于典型的大洋板片熔融的埃达克岩^[46~48]。目前,对这些含矿的钾质埃达克岩的岩浆起源,有两种不同的成因观点,其一是碰撞加厚的高原下地壳部分熔融^[22],其二是俯冲的新特提斯洋壳残片部分熔融^[44,45]。这两种成因模式均强调初生的埃达克质熔体与中新世钾质-超钾质熔浆组分曾发生相互作用。这些中新世钾质-超钾质岩(13~18 Ma)^[49,50]与冈底斯含矿斑岩(12~17 Ma)^[23~25]在时间上的同时性和空间上的共生性,也暗示两者有相同的地球动力学背景和相关的深部作用过程。

埃达克质岩之所以与 Cu-Mo-Au 矿床密切相关,究其原因,是埃达克质岩浆与正常的长英质岩浆

不同,其以高水含量、高氧逸度($f(\text{O}_2)$)和富硫为特征^[33],因而成为斑岩铜矿的重要含矿母岩和金属-硫的可能载体。富水的俯冲洋壳板片部分熔融,可以导致富水的、具英安质成分特征的埃达克质熔体,其富水性导致高度氧化的岩浆系统,其氧逸度被镍/氧化镍和赤铁矿/磁铁矿缓冲剂缓冲^[51]。同时,氧逸度的提高还引起岩浆系统中 $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比值急剧增大,从而导致S从埃达克质熔体中完全分离^[52]。菲律宾Pinatubo火山1991年喷发的埃达克质岩浆便是极好实例,该岩浆具英安质成分,富含硬石膏,共喷发出20 Mt的 SO_2 ,相当于一个储量为0.60 Mt Cu的大型铜矿的总硫量^[53]。

初生的埃达克质熔体与地幔橄榄岩/幔源熔体的相互作用,可能是埃达克质熔体获取金属和硫的重要途径。在弧造山环境,起源于俯冲洋壳板片的埃达克质熔体在向上运移过程中,势必与上覆的地幔橄榄岩发生相互反应,这将大幅度提高埃达克质熔体的 $\text{Mg}^\#$ 值和Fe、Cr、Ni含量^[46,54],从而增大硫在熔体中的溶解度。另外,这种相互反应也将提高幔岩的 $f(\text{O}_2)$,导致幔岩中的金属氧化并进入岩浆系统。在碰撞造山环境,加厚的下地壳虽然不一定含大量的水,但诱发其部分熔融的幔源熔体在地壳底部成池,并与埃达克质熔体混合,将为埃达克质熔体提供大量的铜和其他金属以及硫^[23],从而具有熔载大量金属和硫的能力。

3 热液系统与蚀变套合(telescoping)

世界范围的斑岩铜矿,不论产出于弧造山环境还是形成于碰撞造山环境,均发育类似的热液蚀变系统和典型的蚀变分带。蚀变系统一般包括早期的K硅酸盐化,随后的石英-绢云母化和晚期的高级泥化,蚀变分带通常呈环带状绕含矿岩体分布,自内而外,依次为K硅酸盐化带→石英-绢云母化→高级泥化带^[55,56]。K硅酸盐化通常发育于斑岩体内部,呈面型分布。石英-绢云母化通常叠加于K硅酸盐化之上,并环绕其分布,主体产出于斑岩体边部。高级泥化蚀变也可能出现较早,但延续时间很长,发育部位较高,叠加于前两个蚀变带之上,主要发育在斑岩体顶部及其与围岩接触带。这种套合式的蚀变分带为判断斑岩体剥蚀程度和工程勘查提供了重要的指示性标志。

斑岩蚀变系统的详细研究表明,K硅酸盐化蚀

变是由高温($>400^\circ\text{C}$)高盐度岩浆流体与斑岩岩石发生水/岩反应的产物,而稍晚形成的石英-绢云母化则是温度和盐度较低的岩浆水-天水混合流体形成的^[57~60]。近年来,这个经典的蚀变分带模型遭到质疑。主要争议出现在高级泥化成因上。一些研究者发现,许多斑岩矿床的热液蚀变系统中并不发育高级泥化,因此认为高级泥化可能与斑岩系统无关^[61]。另外,由于高级泥化蚀变常常是浅成低温热液系统的典型产物^[62],而浅成低温热液矿化常叠加于斑岩矿化系统之上,因此,经典的蚀变分带模型中的高级泥化蚀变更多地标志着浅成低温热液系统的发育^[63]。

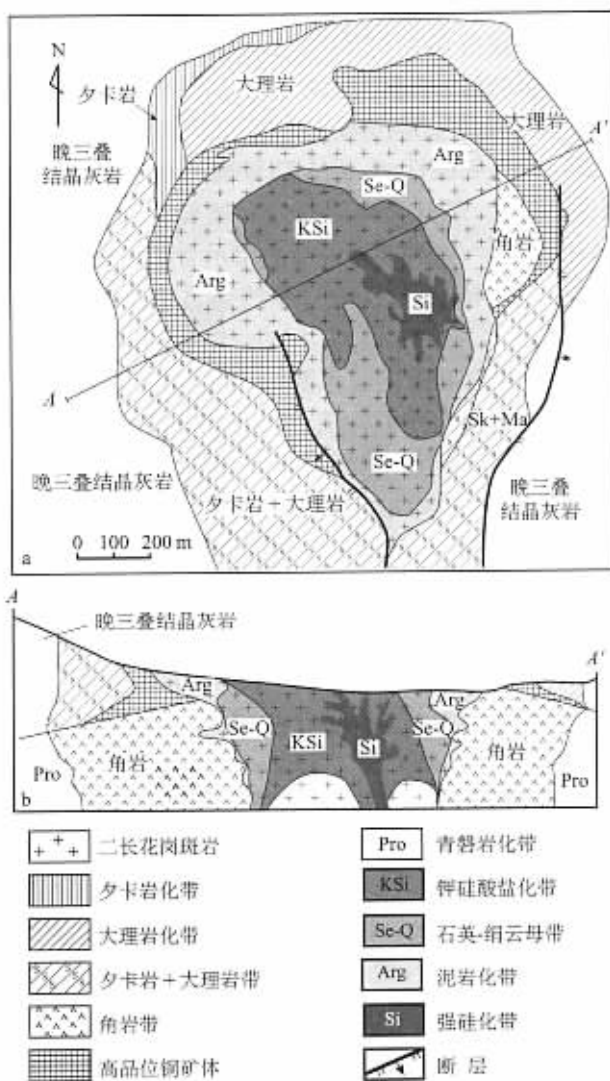


图2 青藏高原东缘玉龙斑岩铜矿床的蚀变分带型式
(据文献[15][17]和[18]修改)

Fig. 2 Alteration zoning of the Yulong porphyry copper deposit in the eastern collisional zone

在碰撞造山环境,如在玉龙斑岩铜矿带,高级泥

化蚀变仅见于玉龙斑岩铜矿中,而其他几个大型铜矿却没有发育^[17,18]。在玉龙矿区,高级泥化蚀变叠加于早期的 K 硅酸盐化带和石英-绢云母化带之上,其发育明显较晚,产出部位较高,受构造控制,与浅成低温热液 Cu-Au 矿化伴生^[16]。高级泥化蚀变有 3 种产出形式,即泥化蚀变、高级泥化蚀变和强硅化蚀变(图 2)。泥化蚀变围绕石英-绢云母化带发育,主要由石英、高岭石、迪开石、蒙脱石等组成,作为补片出现,与低温硫化物-石英脉伴生。硫化物主要为辉铜矿-铜蓝组合,交代斑岩期黄铜矿和黄铁矿。高级泥化蚀变受构造破碎带控制,沿斑岩顶部的热液角砾岩带分布,蚀变岩全部由埃洛石和少量伊利石、明矾石、水铝英石、三水铝石和玉髓构成,与高品位金-铜矿体伴生^[16]。强硅化蚀变主要产出于 K 硅酸盐蚀变带中央,呈含少量明矾石的石英脉带产出,其中发育大量的辉铜矿-石英细脉和网脉。显然,这种高级泥化蚀变叠加于斑岩蚀变系统之上,发育于浅成低温热液矿化阶段,应为浅成低温热液系统产物。

在岛弧造山环境,如在菲律宾 Lepanto-FSE 矿区,类似的高级泥化蚀变也大量发育(图 3)^[64]。这种主要由石英和明矾石构成的高级泥化蚀变带产于斑岩铜矿体的侧翼,并叠加于斑岩型热液蚀变系统的顶部,严格受近水平的断裂控制(图 3)。高级泥化蚀变岩呈平卧的透镜状,包裹典型的浅成低温热液硫砷铜矿-金矿体(图 3),反映高级泥化蚀变是浅成低温热液系统的典型产物。

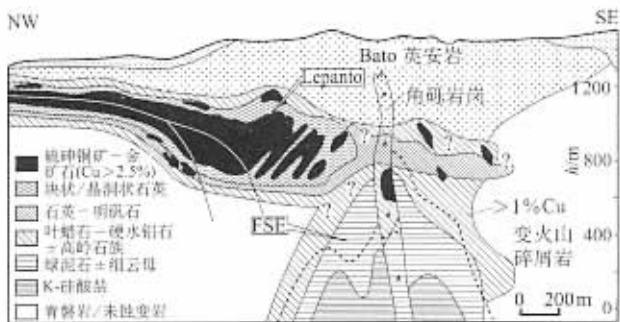


图 3 菲律宾 Lepanto-FSE 矿区的蚀变分带型式^[64]

Fig.3 Schematic alteration distribution in longitudinal section associated with the Far southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippine^[64]

斑岩型热液系统与浅成低温热液系统的时空相依现象,也见于世界范围的许多斑岩型矿床^[63,65]。国外将这种现象称为热液系统的套合作用,并将其成因与同矿化或矿化后期的区域隆升相联系^[66,67]。

4 成矿系统与矿化叠加(Overprinting)

不论是岛弧造山环境还是碰撞造山环境,与斑岩有关的矿化特征,除与斑岩自身特征有关外,在一定程度上受控于斑岩体侵位的围岩岩相环境。当斑岩体侵位于火成岩区或砂板岩系,其矿化类型相对单一,主要为 Cu、Cu-Mo 和 Cu-Au 矿化,主矿体主要容存于斑岩体及其与围岩接触带中。当斑岩体侵位于碳酸岩区时,碳酸岩常常发生夕卡岩化和大理岩化。伴随着夕卡岩化作用,常发生强烈的铅锌铜多金属矿化,黄铜矿-闪锌矿-方铅矿-黄铁矿等金属硫化物在退化蚀变(retrograde alteration)阶段大量堆积,形成夕卡岩容矿的多金属矿体。过去,人们常将其作为一个单独的矿床类型,实际上,它们与斑岩型铜矿构成了一个成矿系统,在国外,人们则仍将其称为斑岩型矿床。

本文所述的矿化叠加,是指斑岩型矿化被后期的浅成低温热液矿化的叠加,这种现象广泛地见于世界范围内的许多斑岩成矿省或成矿带^[63,64,66,67]。矿化叠加既可以处于同一空间,也可近距离分离。前者以玉龙斑岩铜矿为代表,后者以 Lepanto-FSE 为特征。在玉龙矿区,浅成低温热液矿化叠加于矿化斑岩上,导致斑岩型矿体的 Cu-Mo 活化与再分配,以及辉铜矿对黄铜矿的强烈交代,同时,更重要的是,在矿化斑岩顶部形成似层状或透镜状的高品位 Au-Cu 矿体^[16],后者因剥蚀而成环状体,绕矿化斑岩体分布^[17,18](图 4)。在 Lepanto-FSE 矿区,被斑岩岩浆驱动的浅成低温热液流体沿构造破碎带和岩相界面侧向运移,导致以石英-明矾石为特征的高级泥化蚀变带和硫砷铜矿-金矿体发育^[64](图 5)。

斑岩型热液系统与浅成低温热液系统的相隔时限通常是比较短暂的,因为,后者的热液流体虽然以天水为主,但仍有部分岩浆水贡献,并且,该热液系统仍靠斑岩体驱动和维系^[64]。Arribas 等精细测定了 Lepanto-FSE 矿区两套热液系统及其产物的 K-Ar 年龄,发现斑岩型热液系统年龄为 (1.41 ± 0.05) Ma,而浅成低温热液系统年龄为 (1.3 ± 0.07) Ma,两者时差不足 1 Ma^[10]。当然,时限稍长的也不乏实例,例如安第斯斑岩带的许多矿床,其相隔时限在 1~3 Ma^[68]。在玉龙矿床,其相隔时限可能超过 4 Ma^[19]。

大量研究表明,与斑岩型矿床叠加的浅成低温热液矿化均为高硫化型的^[63,64],其形成温度介于 90

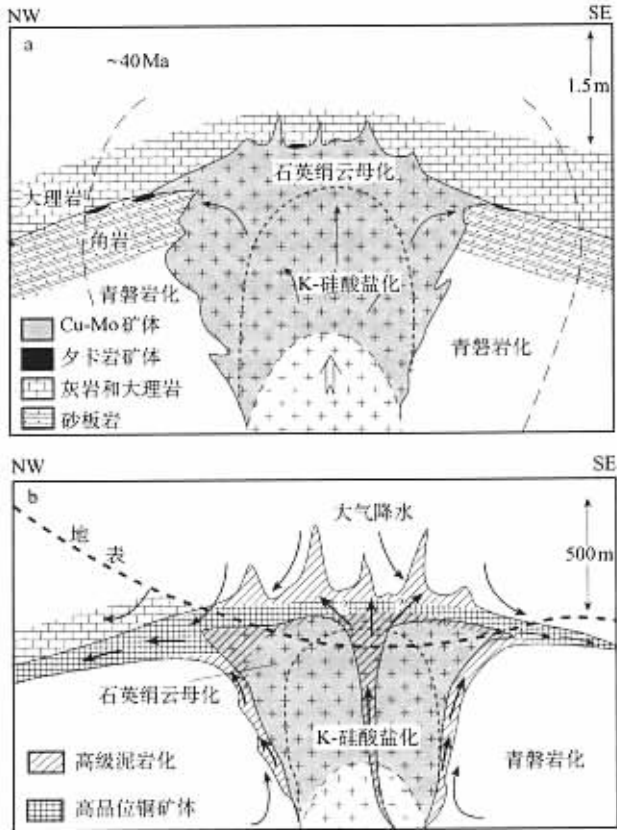


图4 青藏高原东缘玉龙斑岩铜矿床成矿模式^[16]

Fig.4 Schematic longitudinal section through the Yulong porphyry Cu deposit in eastern Tibet, showing possible processes of alteration and associated mineralization for early-stage porphyry Cu-Mo system at 40 Ma (a) and subsequent epithermal high-sulfidation Au-Cu system (b)

~ 480 °C 之间 ,集中于 230 ~ 260 °C 范围 ,成矿流体以天水为主 ,形成深度在古潜水面之下 300 ~ 500 m 范围^[62,69,70]。与之不同 ,斑岩型矿床的早期蚀变和铜矿化的形成温度范围为 400 ~ 600 °C ,成矿流体以岩浆水为主 ,流体盐度在 30% ~ 60% NaCl 范围 ,晚期蚀变及成矿流体出现部分天水 ,温度降低至 200 ~ 400 °C ,盐度降低至 15 % NaCl 以下。斑岩型矿化形成深度一般在 1 ~ 4 km 之间^[11]。

5 构造控制与动力机制

斑岩 Cu-Mo-Au 系统的发育与 3 个关键过程或作用有关 ,即①岩浆起源的深部过程 ;②岩浆浅成侵位的输导系统 ;③流体排放-金属淀积的伸展环境。在构造上 ,这三大过程或作用又与板片俯冲作用、地壳加厚与抬升作用 ,以及不同性质的断裂系统有关。

5.1 板片俯冲

不论是 大洋板片 还是 大陆板片 的俯冲 ,均是导

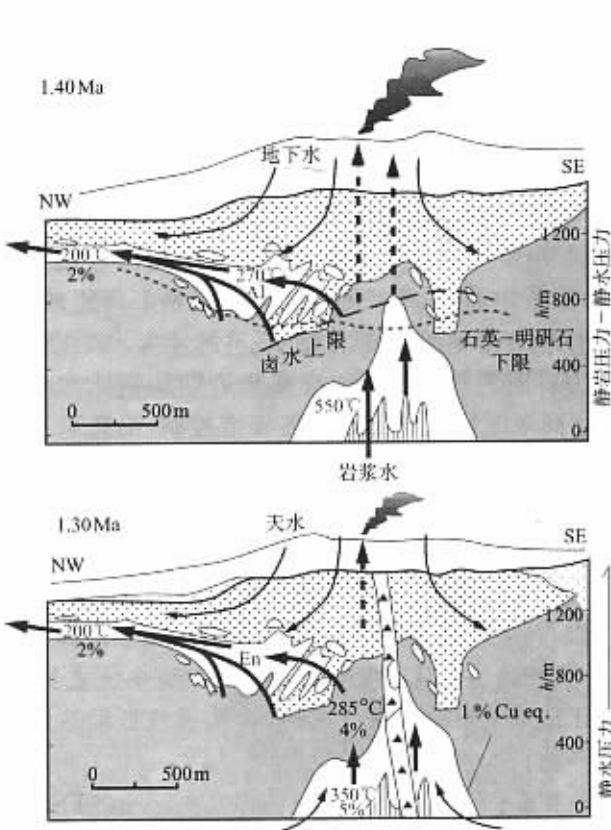
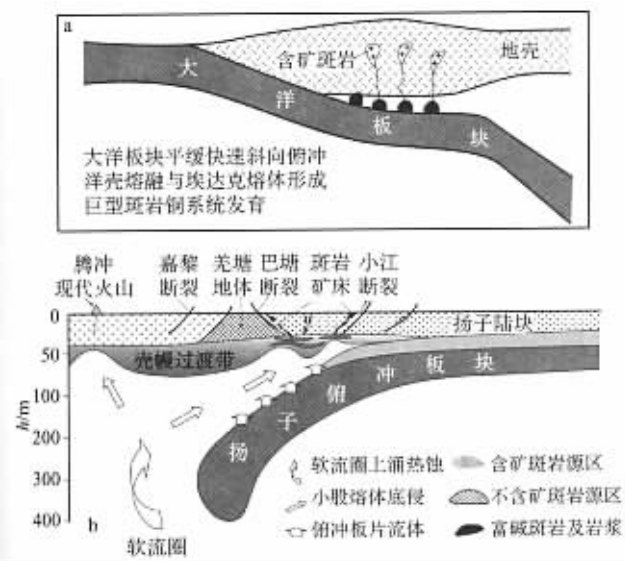


图5 菲律宾 Lepanto-FSE 矿床成矿模式^[64]

Fig.5 Schematic longitudinal section through the Far southeast-Lepanto deposits

致含斑岩岩浆形成发育的主导性动力学机制 ,但这并不意味着只要板片俯冲就可以形成含斑岩岩浆。在弧造山环境 ,俯冲的大洋板片在抵达约 70 km 时必然发生脱水 ,后者携带大量的大离子不相容元素(LILE : K ,Rb ,Ba)进入地幔楔形区并交代地幔^[71]。脱水流体的注入导致交代地幔的液相线温度降低 ,从而诱发部分熔融 ,产生弧火山-岩浆岩^[72]。显然 ,这种俯冲机制只引起地幔楔熔融 ,而俯冲板片自身一般不发生部分熔融。最近研究表明 ,当大洋板片俯冲角度变缓时 ,相变为角闪岩/角闪榴辉岩/榴辉岩的大洋 MORB 板片则成为产生 adakite 质含矿岩浆的理想源区。换句话说 ,大洋板片平缓俯冲(flat subduction)是形成 adakite 的主导机制^[41,42]。例如 ,在安第斯带的智利北部 ,古新世以来陆缘弧演化与岩浆活动受 Farallon 板块的俯冲速率、角度和方向诸因素约束^[33]。在古新世—早中新世 ,Farallon 板块以正常的俯冲速度和中等的俯冲角度向智利大陆边缘下部俯冲 ,诱发地幔楔形区的熔融 ,导致钙碱性弧火山活动和岩浆浅成侵位 ,形成小规模 的斑岩 Cu 系统和浅成低温热液 Au 系统^[68\]。

进入晚中新世, Farallon 板块开始低角度、斜向、快速俯冲^[73, 74], 其直接结果是导致洋壳俯冲板片部分熔融, 形成埃达克质熔体^[33], 并在一个相对封闭体系中演化, 发育成规模巨大的斑岩铜系统(图 6a)。类似地, 在安第斯带中部, Nazca 俯冲板片倾斜程度减小, 伴随着地壳增厚和弧火山作用减弱, 产生埃达克质熔浆, 导致含矿斑岩侵入^[75, 76]。



6 不同构造环境的斑岩铜矿成岩-成矿的构造控制模式

Fig. 6 Possible tectonic models for porphyry Cu-Mo-Au deposits occurring in arc orogenic setting

- a—岛弧造山带(陆缘弧环境—以安第斯为例^[33]);
b—碰撞造山带(以青藏高原东缘斑岩铜金矿带为例^[82])

在碰撞造山带, 大陆板片俯冲不仅是形成大陆碰撞带的主要造山方式, 也是形成含矿斑岩的主要动力机制^[22]。尽管大陆俯冲板片不一定直接熔融产生含矿的埃达克岩, 但大陆板片俯冲诱发的软流圈物质上涌, 可能导致了碰撞加厚的下地壳物质部分熔融。在青藏高原东缘, 即所谓的东碰撞带^[77], 印度大陆向北俯冲—碰撞所产生的应力应变被一系列 NNW 向走滑断裂系统所调节, 而印度大陆向北东方向楔入并与扬子陆块碰撞, 则形成了东喜马拉雅构造结和一系列逆冲褶皱带, 如兰坪—思茅褶皱带^[77]。跨越东碰撞带不同构造单元的两条近 EW 向的地球物理长剖面揭示, 印度大陆板片与扬子大陆板片发生了相向俯冲^[78, 79]。印度大陆板片前缘出现在嘉黎—高黎贡走滑断裂以西地区(94°~97°E), 以缓角度俯冲于特提斯喜马拉雅之下, 俯冲前缘抵达 96°~97°E 后, 突然下插并近垂直延伸至 180 km^[80, 81]。扬子大陆板片出现于嘉黎—高黎贡走滑断裂以东地区(99°~102°E), 该板片沿红河走

滑断裂向西缓角度俯冲, 大约在 100°E 前后, 俯冲板片变陡, 向下斜插, 前缘抵达 250 km 深度^[79](图 6b)。在 NE 向速度扰动剖面上, 扬子大陆俯冲板片影像依然清晰可见, 俯冲板片也在 100°~99°E 区域突然变陡, 前缘抵达近 300 km 深处^[78]。地震层析成像证实, 在两个俯冲板片前缘之间区域(97°~99°E), 发育一个源自 450 km 深处的显著低速的软流圈上涌体, 其在 200~250 km 处被细颈化, 由此向上涌流导致上覆岩石圈显著减薄至 70~80 km, 并侧向向东底侵至上地幔顶部和地壳下部^[79], 甚至在腾冲地区, 底侵的软流圈物质将岩石圈地幔吞噬^[78]。钟大赉等(2001)注意到, 上涌的软流圈顶部不是呈大面积性的“蘑菇”状, 而是呈区带性的直立“瓦板状”^[78]。侯增谦等(2004)提出, 这种高热软流圈的上涌和底侵, 不仅为含矿斑岩岩浆源区——加厚下地壳的部分熔融提供了必要热能, 而且, 高热软流圈的空间形态也从根本上约束了含矿斑岩及伴生熔岩的巨型带状分布(图 6b)。来自软流圈顶部的熔岩体可能呈小股岩浆形式向上注入并与下地壳物质混合, 这种过程导致了埃达克质含矿斑岩相对富 Mg[#] 值和富集过渡性元素(Cr, Ni, Co)的地球化学特征^[82]。

5.2 板片撕裂(tear)与断离(breakoff)

在弧造山带, 顺弧方向的构造—岩浆分段性暗示, 大洋俯冲板片常常不是“铁板一块”, 往往具有不同的俯冲角度。这种板片俯冲角度的变化, 常常在俯冲板片内形成垂直岛弧方向的膝折带(kink band), 并常将俯冲板片分隔成顺弧展布的若干块段(segment)。这种膝折带的产出部位, 在地表往往对应于俯冲带(缝合带)的褶曲部位。如果板片俯冲角度突然变化, 膝折带将可能演变成俯冲板片撕裂带(tear band)。这些膝折带和撕裂带对岛弧环境的岩浆活动及成矿作用有着重要的控制作用。在印度尼西亚, 产出于岛弧环境的斑岩 Cu-Au 系统及其伴生的浅成低温热液高硫化系统, 如 Sumbawa 地区的 Batu Hijau 矿床和 Sulawesi 北部的 Tombuliao 矿集区, 其定位空间均与岛弧地壳下方的俯冲板片膝折带相对应, 矿床空间展布与膝折带延伸方向相吻合。在环西南太平洋岛弧带, 斑岩 Cu-Au 系统和浅成低温热液 Au-Cu 系统的产出, 则与俯冲板片的撕裂和软流圈上涌过程有关^[83](图 7a)。板片撕裂带与岩浆—热液—成矿系统的时空对应关系可能反映了这样的两个事实: ①因板片撕裂而造成的板片俯冲角度

平缓化,导致了俯冲板片的减压熔融,产生埃达克质含矿岩浆;②通过撕裂的板片构造窗(slab window)上涌的软流圈物质可能为板片熔融提供了热能,同时还可能向埃达克质熔浆注入了一部分金属组分。

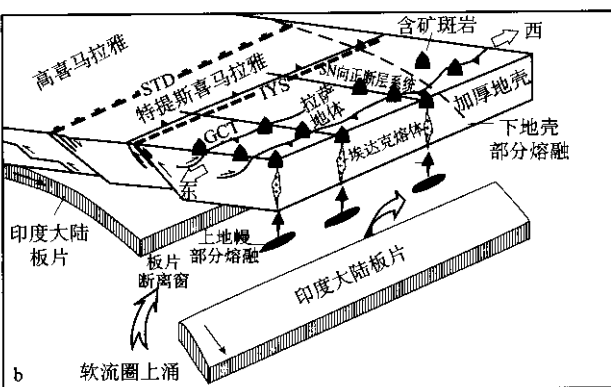
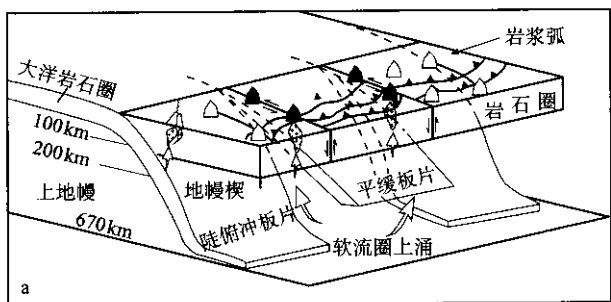


图7 示意俯冲板片类型、形态、构造特征与地壳变形及斑岩 Cu-Mo-Au 矿化时空关系

Fig. 7 Schematic diagrams illustrating the relationship of the type, topology and structure of the subducted slab with the style of crustal deformation and localization of porphyry Cu-Mo-Au systems in arc setting (a) and collision zone setting (b)
图7b中,STD—藏南拆离系;IYS—印度河-雅鲁藏布江缝合带;GCT—冈底斯逆冲断裂带

在碰撞造山带,俯冲的大陆板片可能会发生断裂作用,通过板片断离窗上涌的软流圈物质,将诱发上覆地幔乃至下地壳的部分熔融,形成平行于俯冲碰撞带的热变质-岩浆带。例如,在东西向展布的冈底斯带,年龄为120~60 Ma的弧花岗岩和峰期在55~45 Ma的碰撞期花岗岩,记录了新特提斯大洋板片于白垩纪末期的向北俯冲以及印度大陆与亚洲大陆于60 Ma前后的大规模碰撞。沿冈底斯花岗岩基带,成岩年龄介于12~17 Ma的冈底斯含矿斑岩带^[23,24]和与之伴生的年龄为12~25 Ma的钾质-超钾质火山岩^[26,49,50]构成了一条长达1500 km的中新世钾质岩浆岩带。Maheo 等将其解释为印度大陆板片在25 Ma前后发生板片断离的产物^[84]。侯增谦等(2004)提出,通过板片断离窗上涌的软流圈诱

发了富集地幔的部分熔融,导致了钾质-超钾质火山喷发,而钾质-超钾质岩浆作为一种新生组分(juvenile component)注入下地壳底部,一方面引起加厚的西藏下地壳部分熔融,形成埃达克质含矿岩浆,另一方面,为含矿岩浆贡献部分成矿金属组分(图7b)^[16]。

5.3 区域基底构造与断裂构造

含矿斑岩的浅成侵位主要取决于两个因素:地壳变形和快速隆升。在导致地壳变形的区域性褶皱、逆冲、断裂构造中,大规模走滑断裂系统、切割造山带的断裂系统、平行造山带的逆冲断裂带,是含矿岩浆快速上升和浅成侵位的3大输导系统。

(1)大规模走滑断裂系统。走滑断裂系统是含矿岩浆上升侵位和岩浆流体分凝排泄的通道系统。在不同的构造环境,其发育特征不同。在弧造山带,走滑断裂系统通常是平行岛弧展布的,其形成与大洋板片斜向俯冲和弧-陆斜向汇聚有关。受其控制的矿床实例来自西南太平洋和安第斯。在菲律宾,斑岩铜矿带平行于岛弧展布,受顺弧的走滑断裂带分布^[85]。在安第斯(智利北部),近SN向展布的斑岩铜矿带受顺弧的 West Fissure-Domeyko 走滑断裂带控制^[86,87]。伴随着大规模走滑断裂活动,常常发育走滑拉分盆地,盆缘断裂常为含矿斑岩的浅成侵位提供重要的上侵通道。在碰撞造山环境,走滑断裂系统通常斜交陆-陆碰撞汇聚带,具有调节碰撞应变之功能。例如,在青藏高原东缘,伴随着印度-亚洲大陆60 Ma以来的强烈碰撞,在斜交碰撞带的高原东缘,产生一系列不同方向的新生代走滑断裂带,其中,西部带包括嘉黎和高黎贡走滑断裂,环绕东构造结发育;中部带包括北段巴塘-丽江断裂和南段哀牢山-红河断裂,前者SN向展布,右行走滑,后者NW向延伸,左行走滑,两者构成东侧扬子陆块与西侧羌塘地体的边界断裂;东部带包括龙门山逆冲带和鲜水河、小江走滑断裂^[77]。沿走滑断裂发育一系列派生性的含新生代富碱侵入岩和钾质火山岩的拉张盆地,如贡觉、剑川、大理盆地等,产出大量的富碱斑岩侵入体,构成了著名的金沙江-红河新生代富碱斑岩岩带^[77],控制了与斑岩有关的Cu-Mo-Au矿化带的分布^[82]。其中,在北段江达-芒康地区,伴随车所走滑断裂活动和贡觉拉分盆地发育,形成著名的玉龙斑岩铜矿带。

(2)横切造山带的断裂系统。以垂直或近垂直切割造山带的正断层为特征的断裂系统,是控制含

矿斑岩浅成侵位和矿床空间分布的最重要的构造系统之一。这些断裂系统的成因可能是多样的。在岛弧环境,切弧正断层空间展布与其下部的俯冲板片的膝折带或撕裂带相对应^[88],表明这些切弧正断层可能是由板片撕裂引起的。由于软流圈物质常常通过板片撕裂构造窗上涌,并诱发上覆地幔物质熔融,因此,地壳层次的切弧正断层很可能是沟通浅表与深部过程的高渗流带和斑岩岩浆上升侵位的重要通道。在碰撞造山带,横跨青藏高原出现一系列近 SN 向展布的正断层,其发育时代为中新世,活动年龄 $\leq 14 \text{ Ma}$ ^[28, 29]。SN 向正断层的成因尚有不同意见,一种观点认为,其形成与中新世以来青藏高原岩石圈地幔的大幅度减薄所诱发的地壳隆升和 EW 向伸展有关^[26, 50],另外一种观点则认为其与华北和西伯利亚东南的裂谷系具有相同的动力机制,与整个亚洲大陆之下的大规模地幔对流引起的弧后扩张作用有关^[89]。不论其成因如何,其控矿功能可能类似于切弧正断层系统。横切造山带的断裂系统对斑岩型矿床的控制,明显体现在矿床横切造山带的分布趋势上。在安第斯带,中新世矿床穿弧分布,从 El Teniente 矿床,经 Paramillos Sur 矿床,到智利-阿根廷的 San Luis 矿带,构成一条巨大的切弧斑岩铜矿带,受控于切弧断裂带,空间上对应于俯冲的智利平缓板片南边界附近的板片撕裂带^[11]。美国西部第三纪斑岩矿床的空间分布也证实了切弧断裂的控矿作用^[90]。在巴布亚新几内亚,几个大型矿床也都沿切弧断裂构造分布^[83]。在碰撞造山环境,如在冈底斯带,横切造山带的断裂系统对斑岩型矿床的控制主要表现在 NS 向正断层系统对含矿斑岩及其 Cu-Mo-Pb-Zn 矿化系统的时空定位控制上(图 7b)。空间上,冈底斯中新世斑岩体尽管东西断续成带,但南北串珠成列,东西延伸约 350 km,南北延伸达 80 km,明显受近 NS 向正断层系统控制。时间上,SN 向正断层虽发育于 14 Ma 前后^[27, 28],但东西向伸展却始于 18 Ma^[26]。冈底斯含矿斑岩岩浆活动时限为 12 ~ 17 Ma^[23, 24],而斑岩矿化年龄为 14 ~ 16 Ma^[23 ~ 25]。这种时空关系表明,冈底斯含矿斑岩岩浆侵位和流体分凝上升受控于近 SN 向正断层系统,斑岩型 Cu-Mo-Pb-Zn 矿化发育于地壳伸展和应力释放环境^[23]。

(3) 平行造山带的逆冲断裂带。平行造山带的逆冲断裂带是地壳挤压变形的构造方式,也是岩浆上升侵位的主要通道。在弧造山带,逆冲断裂

带对成矿带控制不太明显,但在碰撞造山带,其与正交或斜交的正断层系统的交汇点,直接限定了含矿斑岩的时空定位。例如,在冈底斯斑岩铜矿带,逆冲断裂带与 NS 向正断层系统的一系列交汇点,既是高热流渗漏的构造薄弱部位,也是含矿斑岩及其驱动的热液成矿系统的定位空间^[15]。

5.4 地壳隆升与剥蚀

不论是弧造山环境还是碰撞造山环境,伴随造山作用的地壳或块体隆升是斑岩铜矿带的普遍特征。最近人们注意到,伴随着斑岩侵位过程的快速隆升和强烈剥蚀对斑岩型矿床的形成以及浅成低温热液成矿系统的叠加至关重要^[66]。这种作用至少表现在 4 个方面:①由于快速的隆升和随后的剥蚀,可能使含矿岩浆在较高的构造层次上侵位;②伴随着块体隆升,斑岩型 Cu-Mo-Au 矿体发生表生富集作用,形成次生富集带,有时,形成由辉铜矿+蓝铜矿+铜蓝+孔雀石+褐铁矿构成的“辉铜矿盖”^[67],覆盖于含矿斑岩体及伴生的斑岩 Cu-Mo 矿体之上;③由于不断的隆升,由含矿斑岩驱动的热液系统的维系时间得以延长,热液流体由以岩浆水为主的中高温流体向以天水为主的低温流体演变,所形成的蚀变带由典型的钾硅酸盐化、绢英岩化和泥化蚀变带被高级泥化带叠加和套合^[67, 68];④由于地壳的不断隆升和热液系统的时限延长,斑岩型 Cu-Mo 矿化的环境(1 ~ 4 km)因抬升而演变为发育浅成低温热液系统的环境(~0.5 km),其结果往往导致浅成低温 Cu-Au 矿化直接叠加于斑岩型 Cu-Mo 矿化之上,使矿床吨位-品位明显提高。

感谢邓军教授邀请我写这篇评述性文章。在研究和成文过程中,得到翟裕生院士、钟大赉院士、莫宣学教授和芮宗瑶研究员的指导。与谢玉玲和高永丰教授、曲晓明、秦克章、曾普胜等研究员的讨论也使我受益匪浅。感谢黄卫总工、孟祥金博士和西藏地矿局的地质和矿山地质专家给予的大力帮助。

References[参考文献]:

- [1] KIRKHAM R V, SINCLAIR W D. Porphyry copper gold molybdenum tungsten tin and silver: Geology of Canadian mineral deposit types [J]. *Geol N Am*, 1995(1): 421-446.
- [2] GUILBERT J M. Geology, alteration, mineralization, and genesis of the bajo de la Alumbrera porphyry copper-gold deposit, Catamarca province, Argentina [J]. *Arizona Geological Society Digest*, 1995, 20: 646-656.

- [3] CAMUS F ,SILLITOE R H ,PETERSEN R. Andean copper deposits :New discoveries ,mineralization style and metallogeny[J]. *Society of Economic Geologists Special Publication* 5 ,1996 ,5 : 198.
- [4] TOOKER E W. Gold in the Bingham District ,Utah[J]. *U. S. Geological Survey Bulletin* 1857E ,1990. 1-16.
- [5] BABCOCK R C J ,BALLANTYNE G H ,PHILLIPS C H. Summary of the geology of the Bingham District ,Utah[J]. *Arizona Geological Society Digest* ,1995 20 :316-335.
- [6] MACDONALD G D ,AMOLD L C. Geological and geochemical zoning of the Grasberg igneous complex ,Irian ,Jaya ,Indonesia [J]. *Journal of Geochemical Exploration* ,1994 50 :145-178.
- [7] RUSH P M ,SEEGERS H J. Ok Tedi copper-gold deposits[A]. HUGHES F E. *Geology of the Mineral Deposits of Australia and Papua New Guinea*[C]. Australian :Australian Institute of Mining and Metallurgy ,1990. 1747-1754.
- [8] CLARK G H. Panaguna copper-gold deposit[A]. HUGHES F E. *Geology of the Mineral Deposits of Australia and Papua New Guinea*[C]. Australian :Australian Institute of Mining and Metallurgy ,1990. 1807-1816.
- [9] MELDRUM S J ,AQUINO R S ,GONZALES R I ,et al. The Batu Hijau porphyry copper-gold deposit ,Sumbawa Island ,Indonesia [J]. *Journal of Geochemical Exploration* ,1994 50 :203-220.
- [10] ARRIBAS A J ,HEDENQUIST J W ,TAYA T ,et al. Contemporaneous formation of adjacent porphyry and epithermal Cu-Au deposits over 300 ka in northern Luzon ,Philippines[J]. *Geology* , 1995 23 :337-340.
- [11] KERRICH R ,GOLDFARB R ,GROVES D ,et al. The characteristics ,origins and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces[J]. *Science in China* ,2000 43 :1-68.
- [12] CATHLES L M ,GUBER A L ,LENAGH T C ,et al. Kuroko-type massive sulfide deposits of Japan :Products of an aborted island-arc rift[J]. *Economic Geology* ,1983 78 :96-114.
- [13] UYEDA S ,KANAMORI H. Back-arc opening and the model of subduction[J]. *Jour Geophys Res* ,1979 ,84 :1040-1061.
- [14] HOU Zengqian ,YANG Yueqing ,QU Xiaoming ,et al. Tectonic evolution and mineralization systems of the Yidun arc orogen in Sanjing Region ,China[J]. *Acta Geologica Sinica* ,2004 ,78 : 109-120(in Chinese). [侯增谦 ,杨岳清 ,曲晓明 ,等. 三江地区义敦岛弧造山带演化和成矿系统[J]. *地质学报* ,2004 , 78 :109-120.]
- [15] HOU Z Q ,MA H W ,ZAW K ,et al. The Himalayan Yulong porphyry copper belt :Product of large-scale strike-slip faulting in eastern Tibet[J]. *Economic Geology* ,2003 98 :125-145.
- [16] HOU Z Q ,QU X M ,RUI Z Y ,et al. The Gangdese Miocene porphyry copper belt generated during post-collisional extension in the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. *Economic Geology* ,2004 (in press).
- [17] RUI Zongyao ,HUANG Chongke ,QI Guomin ,et al. *The Porphyry Cu (-Mo) Deposits in China*[M]. Beijing : Geological Publishing House ,1984. 1-350(in Chinese). [芮宗瑶 ,黄崇珂 ,齐国明 ,等. 中国斑岩铜(钼)矿床[M]. 北京 :地质出版社 , 1984. 1-350.]
- [18] TANG Renli ,LUO Huaisong. *The Geology of Yulong Porphyry Copper (Molybdenum) Ore Belt ,Xizang (Tibet)*[M]. Beijing : Geological Publishing House ,1995. 1-320(in Chinese). [唐仁里 ,罗怀松. 西藏玉龙斑岩铜(钼)矿带地质[M]. 北京 :地质出版社 ,1995. 1-320.]
- [19] HOU Z Q ,ZENG P S ,GAO Y F ,et al. The Himalayan Cu-Mo-Au mineralization in the eastern Indo-Asian collision zone : Constraints from Re-Os dating of molybdenite[J]. *Mineralum Deposita* ,2004 (in press).
- [20] QU Xiaoming ,HOU Zengqian ,HUANG Wei. Is the Gangdese porphyry copper belt the " Yulong porphyry copper belt in Tibetan plateau "[J]. *Mineral Deposits* ,2001 ,20 :355-366(in Chinese). [曲晓明 ,侯增谦 ,黄卫. 冈底斯斑岩铜成矿带 :西藏第二条" 玉龙 "斑岩铜矿带[J]. *矿床地质* ,2001 ,20 :355-366.]
- [21] SCHARER E ,XU R-H ,ALLEGGERE C J. U-Pb geochronology of the Gangdese (Transhimalaya) plutonism in the Lhasa-Xizang region ,Tibet[J]. *Earth Planet Sci Lett* ,1984 69 :311-320.
- [22] HOU Z Q ,MO X X ,QU X M ,et al. Origin of adakitic rocks generated during the mid-Miocene east-west extension in south Tibet [J]. *Earth Planet Sci Lett* ,2004 ,220 :139-150.
- [23] HOU Zengqian ,QU Xiaoming ,WANG Shuxian ,et al. Re-Os ages of molybdenite in the Gangdise porphyry copper belt ,Qinghai-Tibet Plateau :Timing of mineralization and application of the dynamic background[J]. *Science in China (Series D)* ,2003 33 : 609-618(in Chinese). [侯增谦 ,曲晓明 ,王淑贤 ,等. 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[J]. *中国科学(D 辑)* ,2003 33 :609-618.]
- [24] RUI Zongyao ,HOU Zengqian ,QU Xiaoming ,et al. Metallogenic epoch of gangdese porphyry copper belt and uplift of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Mineral Deposit* ,2003 ,22 :217-225(in Chinese). [芮宗瑶 ,侯增谦 ,曲晓明 ,等. 冈底斯斑岩铜矿成矿时代与青藏高原隆升[J]. *矿床地质* ,2003 ,22 :217-225.]
- [25] MENG Xiangjin ,HOU Zengqian ,GAO Yongfeng ,et al. Development of porphyry copper-molybdenum-lead-zinc ore-forming system in east Gangdese belt ,Tibet :Evidence from Re-Os age of molybdenite in Bangpu copper polymetallic deposit[J]. *Mineral Deposits* ,2003 ,22 :246-252(in Chinese). [孟祥金 ,侯增谦 ,高永丰 ,等. 西藏冈底斯斑岩铜钼铅锌成矿系统 :来自邦浦铜多金属矿床辉钼矿 Re-Os 年龄证据[J]. *矿床地质* , 2003 22 :246-252.]
- [26] WILLIAMS H ,TURNER S ,KELLEY S ,et al. Age and composition of dikes in Southern Tibet :New constraints on the timing of east-west extension and its relationship to post-collisional volcanism[J]. *Geology* 2001 29 :339-342.
- [27] COLEMAN M ,HODGES K. Evidence for Tibetan Plateau uplift before 14 Ma ago from a new minimum age for east-west extension [J]. *Nature* ,1995 374 :49-52.

- [28] BLISNIUK P M ,HACKER B ,GLODNY J ,et al. Normal faulting in central Tibet since at least 13.5 Myr ago[J]. *Nature* ,2001 , 412 :628-632.
- [29] THIEBLEMONT D ,STEIN G ,LESCUYER J L. Epithermal and porphyry deposits :The adakite connection[J]. *Cr Acad Sci II A* , 1997 325 :103-109.
- [30] SAJONA F G ,MAURY R C. Association of adakite with gold and copper mineralization in the Philippines[J]. *Cr Acad Sci II A* , 1998 326 :27-34.
- [31] DEFANT M J ,KEPEZHINSKAS P. Evidence suggests slab melting in arc magmas[J]. *EOS* ,2001 82 :62-69.
- [32] DEFANT M J ,XU J-F ,KEPEZHINSKAS P ,et al. Adakite :Some variations on a theme[J]. *Acta Petrologica Sinica* ,2002 ,18 : 129-142.
- [33] OYARZUN R ,MARQUEZ A ,LILLO J ,et al. Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile : Adakitic versus normal calc-alkaline magmatism[J]. *Mineralium Deposita* ,2001 36 :794-798.
- [34] MUNGALL J E. Roasting the mantle :Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits[J]. *Geology* ,2002 30 : 915-918.
- [35] HOU Zengqian ,MO Xuanxue ,GAO Yongfeng ,et al. Adakite : A possible host rock for porphyry copper deposits—A case study of porphyry copper belts in Tibetan Plateau and in northern Chile [J]. *Mineral Deposits* ,2003 22 :1-12(in Chinese). [侯增谦 ,莫宣学 ,高永丰 ,等.埃达克岩-斑岩铜矿的重要含铜母岩——以西藏和智利斑岩铜矿为例[J]. *矿床地质* ,2003 22 : 1-12.]
- [36] WANG Qiang ,XU Jifeng ,ZHAO Zhenhua ,et al. Intermediate-acid igneous rocks strongly depleted in heavy rare earth elements (or adakitic rocks) and copper-gold metallogenesis[J]. *Earth Science Frontiers* ,2003 ,10(4) 561-572(in Chinese). [王强 ,许继峰 ,赵振华 ,等.强烈亏损重稀土的中酸性侵入岩(或埃达克质岩)与 Cu-Au 成矿作用[J]. *地学前缘* ,2003 ,10 (4) 561-572.]
- [37] ZHANG Qi ,WNAG Yan ,QIAN Qing ,et al. The characteristics and tectonic-metallogenic significance of adakites in Yanshanian period from eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica* ,2001 , 17 :236-244(in Chinese). [张旗 ,王焰 ,钱青 ,等.中国东部中生代埃达克岩的特征及构造-成矿意义[J]. *岩石学报* , 2001 17 :236-244.]
- [38] DEDANT M J ,DRUMMOND M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature* , 1990 34 :662-665.
- [39] RAPP R P ,WATSON E B. Dehydration melting of metabasalts at 8 ~32 kbar : Implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. *Jour Petrol* ,1995 36 :891-931.
- [40] PEACOCK S M ,RUSHER T ,THOMPSON A B. Partial melting of subducting oceanic crust[J]. *Earth Planet Sci Lett* ,1994 , 121 :224-227.
- [41] GUTSCHER MA ,MAURY R ,EISSEN J P ,et al. Can slab melt- ing be caused by flat subduction[J]? *Geology* ,2000 28 :535-538.
- [42] PETFORD N ,ATHERTON M. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust :The Cordillera Blanca batholith ,Peru [J]. *Jour Petrol* ,1996 37 :1491-1521.
- [43] XU J F ,SHINJO R ,DEFANT M J ,et al. 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.
- [44] GAO Yongfeng ,HOU Zengqian ,WEI Ruihua ,et al. Petrology , geochemistry of the Neogene Gangdese porphyries and its geodynamic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica* ,2003 ,19 :418-428(in Chinese). [高永丰 ,侯增谦 ,魏瑞华 ,等.冈底斯晚第三纪斑岩的岩石学、地球化学及其地球动力学意义[J]. *岩石学报* ,2003 ,19 :418-428.]
- [45] GAO Y F ,HOU Z Q ,WEI R H. Post-collisional adakitic porphyries in Tibet : Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic constraints on partial melting of oceanic lithosphere and crust-mantle interaction [J]. *Acta Geologica Sinica* ,2003 77 :123-135.
- [46] KAY R W J. Aleutian magnesium andesites ; melts from subducted Pacific oceanic crust[J]. *Jour Volcan Geotherm Res* ,1978 4 : 117-132.
- [47] STERN C R ,KILIAN R. Role of the subducted slab ,mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone[J]. *Contrib Miner Petrol* ,1996 , 123 :263-281.
- [48] 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]. *Jour Geol* ,1993 101 :703-714.
- [49] MILLER C ,SCHUSTER R ,KLOTZLI U ,et al. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet : Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis[J]. *Jour Petrol* ,1999 40 :1399-1424.
- [50] TURNER S ,HAWKESWORTH G ,LIU J ,et al. Timing of Tibetan uplift constrained by analysis of volcanic rocks[J]. *Nature* , 1993 364 :50-54.
- [51] IMAI A ,LISTANCO E L ,FUJII T. Petrologic and sulfur isotopic significance of highly oxidized and sulfur-rich magma of Mount Pinatubo ,Philippines[J]. *Geology* ,1993 21 :699-702.
- [52] BURNHAM C W. Magma and hydrothermal fluids[A]. BARNES H L. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*[M]. 2nd. New York :Holt ,Rinehart and Winston ,1979. 71-136.
- [53] HATTORI K H ,KEITH J D. Contribution of mafic melt to porphyry copper mineralization : Evidence from Mount Pinatubo , Philippines and Bingham Canyon ,Utah ,USA[J]. *Mineralium Deposita* ,2001 36 :799-806.
- [54] KELEMAN B P. Genesis of high Mg[#] andesites and the continental crust[J]. *Contrib Mineral Petrol* ,1995 120 :1-19.
- [55] MEYER C ,HEMLEY J J. Water-rock alteration[A]. BARNES H L. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*[M]. New York : Holt ,Rinehart and Winston ,1967. 166-235.

- [56] LOWELL J D ,GUBERT J M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits[J]. *Econ Geol* , 1970 65 :373-408.
- [57] SHEPPARD S M F ,NIELSON R L ,TAYLOR H P J. Oxygen and hydrogen isotope ratios of clay minerals from porphyry copper deposits[J]. *Econ Geol* ,1969 64 :755-777.
- [58] SHEPPARD S M F. Hydrogen and oxygen isotope ratios in minerals from porphyry copper deposits[J]. *Econ Geol* ,1971 66 :515-542.
- [59] ROEDDER E. Fluid inclusion studies on the porphyry-type ore deposits at Bingham ,Utah ,Butte ,Montana ,and Climax ,Colorado [J]. *Econ Geol* ,1971 66 :98-120.
- [60] REYNOLDS T J ,BEANE R E. Evolution of hydrothermal fluid characteristics at the Santa Rita ,New Mexico , porphyry copper deposit[J]. *Econ Geol* ,1985 80 :1328-1347.
- [61] WILLIAMS S A ,FORRESTER J D. Characteristics of porphyry copper deposits[J]. *Arizona Geological Society Digest* ,1995 20 : 21-34.
- [62] HEDENQUIST J W ,ARRIBAS A J ,GONZALEZ-URIEN E. Exploration for epithermal gold deposits[J]. *Reviews in Economic Geology* ,2000 13 :245-277.
- [63] PERELLO J ,COX D ,GARAMJAV D ,et al. Oyu Tolgoi ,Mongolia : Siluro-Devonian porphyry Cu-Au-(Mo) and high-sulfidation Cu mineralization with a Cretaceous chalcocite blank[J]. *Econ Geol* ,2001 96 :1407-1428.
- [64] HEDENQUIST J W ,ARRIBAS A J ,REYNOLDS T J. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system : Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits ,Philippines[J]. *Econ Geol* ,1998 93 :373-404.
- [65] SILLITOE R H. Gold deposits in Western Pacific island arcs : The magmatic connection[J]. *Econ Geol Mon* 6 , 1989. 274-291.
- [66] SILLITOE R H. Major regional factors favouring large size ,high hypogene grade ,elevated gold content and supergene oxidation and enrichment of porphyry copper deposits[A]. PORTER T M. *Porphyry and Hydrothermal Copper and Gold Deposits—A Global Perspective*[C]. Perth ,Adelaide : Australian Mineral Foundation/ PGC Publishing ,1998. 49-60.
- [67] PERELLO J. Geology ,porphyry Cu-Au ,and epithermal Cu-Au-Ag mineralization of the Tombulito district , North Sulawesi , Indonesia[J]. *Jour Geochem Explor* ,1994 50 :221-256.
- [68] SILLITOE R H. Epochs of intrusion-related copper mineralization in the Andes[J]. *Jour South Am Ear Sci* ,1988 1 :89-108.
- [69] ARIBAS A Jr. Characteristics of high-sulfidation epithermal deposits and their relation to magmatic fluid[J]. *Mineralogical Association of Canada Short Course Series* ,1995 23 :419-454.
- [70] SILLITOE R H. Styles of high-sulfidation gold ,silver and copper mineralizations in porphyry and epithermal environments[J]. *Pacific Rim Congress ,Bali ,Indonesia ,Australian Institute of Mining and Metallurgy ,Proceedings* ,1999. 29-44.
- [71] TATSUMI Y. Generation of arc basalt magma and thermal structure of the mantle wedge in subduction zones[J]. *Journal of Geophysical Research* ,1983 88 (B7) :5815-5825.
- [72] TATSUMI Y. Chemical characteristics of fluid phase released from a subduction lithosphere and origin of arc magma : Evidence from high pressure experiments and natural rocks[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* ,1986 29 :293-309.
- [73] DAVIDSON J ,MPODOZIS C. Regional geological setting of epithermal gold deposits ,Chile[J]. *Econ Geol* ,1991 86 :1174-1186.
- [74] JAMES D E ,SACK I S. Cenozoic formation of the central Andes : A geophysical perspective[J]. *Soc Econ Geol Spec Pub* 7 , 1999 7 :1-25.
- [75] SKEWES M A ,STERN C R. Genesis of the giant late Miocene to Pliocene copper deposits of central Chile in the context of Andean magmatic and tectonic evolution[J]. *International Geology Review* ,1995 37 :893.
- [76] KAY S M ,MPODOZIS C ,COIRA B. Neogene magmatism , tectonism and mineral deposits of the central Andes (22° to 33° S Latitude) [J]. *Soc Econ Geol Spec Pub* 7 ,1999 7 :27-59.
- [77] WANG J-H ,YIN A ,HARRISON T M ,et al. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone [J]. *Earth Planet Sci Lett* 2001 199 :123-133.
- [78] ZHONG Dalai , DING Lin , LIU Fengqing , et al. The poly-layered architecture of lithosphere in the orogen and its constraint on Cenozoic magmatism[J]. *Science in China* ,2001 30 :1-8(in Chinese). [钟大赉 ,丁林 ,刘凤清 ,等. 造山带岩石层多向层架构造及其对新生代岩浆活动约束——以三江及邻区为例 [J]. 中国科学 2001 30 :1-8.]
- [79] LIU Futian , LIU Jianhua , HE Jiankun , et al. The subducted slab of the Yangtze continental block beneath the Tethyan orogen in western Yunnan[J]. *China Sci Bull* 2000 45 :79-84(in Chinese). [刘福田 ,刘建华 ,何建坤 ,等. 滇西特提斯造山带下扬子地块的俯冲板片 [J]. 科学通报 2000 45 :79-84.]
- [80] JIANG Chaosong ,WANG Shaojin ,ZHOU Ruiqi ,et al. Dynamic study of the Tengchong volcanic active structure[J]. *Seismological Research* ,2000 23 :179-187(in Chinese). [姜朝松 ,王韶晋 ,周瑞琦 ,等. 腾冲火山活动构造动力学研究 [J]. 地震研究 2000 23 :179-187.]
- [81] WANG Chunyong , LOU Hai , WU Jianping , et al. Seismological study on the crustal structure of the Tengchong volcano-geothermal area[J]. *Acta Seismologica Sinica* ,2002 24 :230-240(in Chinese). [王椿镛 ,楼海 ,吴建平 ,等. 腾冲火山地热区地壳结构的地震学研究 [J]. 地震学报 ,2002 24 :230-240.]
- [82] HOU Zengqian ,ZHONG Dalai ,DENG Wanming. A tectonic model for porphyry copper-molybdenum-gold deposits in the Eastern Indo-Asian collision zone[J]. *Geology in China* ,2004 31 :1-16(in Chinese). [侯增谦 ,钟大赉 ,邓万明. 青藏高原东缘斑岩铜钼金成矿带的构造模式 [J]. 中国地质 2004 31 :1-16.]
- [83] CORBETT G J ,LEACH T M. Southwest Pacific Rim gold-copper systems : Structure ,alteration and mineralization[J]. *Society of*

- Economic Geologists*, 1998, 6(Special Publication 6): 240.
- [84] MAHEO G ,GUILLOT S ,BLICHERT-TOFA J et al. A slab break-off model for the Neogene thermal evolution of Southern Karakorum and South Tibet[J]. *Earth Planet Sci Lett* 2002 ,195 : 45-58.
- [85] SILLITOE R H ,GAPPE I M Jr. Phillippine porphyry copper deposits :Geologic setting and characteristics[J]. *Bangkok ,United Nations ESCAP ,CCOP Technical Publication* 14 ,1984 ,14 : 89.
- [86] BAKER R C ,GUILBERT J M. Regional structural control of porphyry copper deposits in northern Chile[A]. The Geological Society of America. *Programs of 1987 Annual Meeting and Exposition of Geological Society of America* 19 (Abstract) [C]. New York :The Geological Society of America ,1987. 578.
- [87] RICHARDS J P ,BOYCE A J ,PRINGLE M S. Geologic evolution of the Escondida area ,northern Chile : A model for spatial and temporal location of porphyry Cu mineralization[J]. *Econ Geol* , 2001 96 : 271-306.
- [88] SASSO A M ,CLAK A H. The Farallon Negro Group ,Northwest Argentina :Magmatic ,hydrothermal and tectonic implications for Cu-Au metallogeny in the Andean back-arc[J]. *Society of Economic Geologists Newsletter* ,1998 34 : 8-18.
- [89] YIN A ,HARRISON T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Ann Rev Earth Planet Sci* ,2000 28 : 211-280.
- [90] LANG I M ,NAESER C W ,MICKEE J M. Mineralization and ages of plutonic and volcanic rocks within the Idaho porphyry belt near Lincoln ,Montana[A]. The Geological Society of America. *97th Meeting* ,16 ,Abstract with Programs[C]. New York :The Geological Society of America ,1984. 568.

PORPHYRY Cu-Mo-Au DEPOSITS : SOME NEW INSIGHTS AND ADVANCES

HOU Zeng-qian

(*Institute of Mineral Resources , Chinese Academy of Geological Sciences , Beijing 100037 , China*)

Abstract : The porphyry-type Cu-Mo-Au deposit is a significant genetic type of Cu-Mo and Cu-Au deposits ,to which close attention has been paid widely. Some new advances in the research of such deposits have been achieved in recent years. These advances are based on some new insights into the geodynamic setting ,the magmatic affinity of Cu porphyry ,the telescoping of alteration system and the overprinting of epithermal system ,and the structural control on porphyry Cu system. Many of porphyry-type deposits occur in island-arc and continental margin arc settings ,however ,some porphyry-type deposits also occur in collision orogenic settings ,which shows that continental collision zones have significant potential for generating porphyry Cu systems. The Cu-bearing porphyries in arc settings are mainly calc-alkaline and potassic calc-alkaline ,whereas the ones in collision orogen settings are dominantly potassic calc-alkaline and shoshonitic. The majority of porphyries in both two settings show magmatic affinity with adakite. The arc porphyries were derived from adakitic melt produced by partial melting of oceanic-slab due to flat subduction. The adakitic magmas in collision zones were derived from melting of thickened lower-crust ,triggered by break-off of subducted continental slab. In arc settings ,the kinks or the tear in the subducted slab result not only in flattening of the slab and asthenospheric upwelling ,but also in the coupling deformation of the crust and the formation of transverse-arc faults ,which control spatial localization of porphyry Cu systems. In collision orogens ,the break-off of the subducted continental slab localizes asthenospheric upwelling ,which inputs juvenile components and provides enough heat to cause the melting of thickened lower-crust. Like transverse-arc faults ,the transverse-collision zone normal faults ,formed by post-collisional crust extension ,facilitate rapid ascent of magmas to high-levels in the overlying crust ,where vapor saturation ,exsolution of volatiles and Cu-Mo-Au deposition may occur. Whether in the oblique-convergence arc settings or in the collision orogenic settings ,a series of large-scale strike-slip faults and associated pull-apart basins ,usually developed either along magmatic arc or orthogonal to the orientation of main collision zone ,are the significant conduit systems to facilitate the high-level emplacement of magmas and favor the decoupling of ore-forming fluids from as-

ceding magmas. In many porphyry metallogenic provinces ,the early-formed concentric K silicate (inner) and quartz-sericite alteration (outer) zones associated with mineralized porphyry body were usually overprinted by the later ,structurally controlled advanced argillic alteration ,showing the telescoping of alteration assemblages. Mean-time ,the early-formed porphyry-type Cu-Mo orebody was overprinted by epithermal Cu-Au mineralization ,which formed either isolated ,but spatially coexisted ,two deposits ,or a high-grade giant deposit. The telescoping and overprinting are widely regarded to be related to the regional uplift and exhumation during the syn- or post- mineralization phase.

Key words : porphyry-type deposits ; adakite ; overprinting mineralization ; structural control ; geodynamic setting

~~~~~

### 本刊编辑部声明 :

为适应我国信息化建设需要 ,扩大作者学术交流渠道 ,本刊已加入《中国学术期刊( 光盘版 )》和“ 中国期刊网 ”、“ 万方数据——数字化期刊群 ”、“ 中文科技期刊数据库 ”,并提供网络信息服务。作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。如作者不同意将文章编入这些数据库 ,请在来稿时声明 ,本刊将作适当处理。目前《地学前缘》编辑部已将近年期刊数据上网 ,提供全文浏览服务 ,欢迎登录中国地质大学( 北京 )学术刊物《地学前缘》主页 ,网址 <http://www.cugb.edu.cn>。