

斑岩铜矿床在东特提斯成矿域中的 时空分布特征

张洪瑞¹⁾, 侯增谦¹⁾, 宋玉财¹⁾, 李政¹⁾, 杨志明¹⁾, 王召林¹⁾, 王晓虎¹⁾, 王淑贤²⁾

1) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037; 2) 国家地质实验测试中心, 北京, 100037

内容提要:已有的斑岩铜矿床成矿模型多是建立在环太平洋地区矿床资料的基础上, 相对而言, 特提斯成矿域中的斑岩铜矿床还有待梳理和总结。本文以特提斯构造演化与成矿为主线, 将东特提斯成矿域中的斑岩铜矿床空间上划分为土耳其 Pontides、伊朗中部 Sahand-Bazman、巴基斯坦 Chagai、中国玉龙、中甸、班公湖、冈底斯 7 条成矿带和中南半岛、土耳其 Anatolides 地块 2 个成矿区; 时间上分别对应于早三叠世、晚三叠世、白垩纪中期、白垩纪末—古新世初、中始新世、中中新世等 6 个时段; 构造背景分别为古、新特提斯洋盆俯冲或俯冲后的碰撞; 讨论认为 Sahand-Bazman 铜矿带的形成背景与玉龙成矿带可对比。

关键词: 斑岩铜矿床; 成矿模型; 时空分布; 东特提斯成矿域

过去 30 多年间, 斑岩铜矿的研究取得了突飞猛进的发展。从蚀变、矿化规律的总结 (Lowell et al., 1970; Sillitoe, 1973), 到板块构造控制模型的提出 (Sillitoe, 1972); 从构造岩浆过程的深入认识 (Titley et al., 1981; Hedenquist et al., 1998), 到地球动力学背景的基本把握 (Richards, 2003; Hou et al., 2003, 2004; Cooke et al., 2005; Richards et al., 2007)。这些进展完善了斑岩铜矿的成矿模型, 为成矿理论的构建及找矿勘查工作提供了基础和保障。但是, 已有的大量资料多是对环太平洋成矿域, 尤其是西南太平洋地区, 与俯冲有关的斑岩铜矿床的研究。相对而言, 特提斯成矿域中的众多矿床缺乏详细的研究与总结, 甚至某些著名矿床的成因和动力学背景还不是很清楚 (Jankovic et al., 1987; Cooke et al., 2005)。

特提斯构造带是欧亚大陆南部一条全球性纬向展布的构造带 (潘桂棠, 1994), 它经历了新、老特提斯洋的扩张、沉积和闭合隆起, 两次大规模的板块俯冲碰撞, 而后褶皱形成以中、新生带地质演化为主的地球上最年轻的造山褶皱带 (施俊法等, 2006)。与之对应的, 特提斯成矿域 (the Tethyan metallogenic domain, TMD) 一般也被认为是位于欧亚大陆与冈

瓦纳大陆的交接部位, 赋存于特提斯造山带中。其东西向延伸逾 10000km, 西起地中海西部, 向东进阿尔卑斯、欧洲东南部, 过土耳其, 小高加索, 伊朗中北部、巴基斯坦、阿富汗, 经帕米尔延至喜马拉雅, 再向南转向中南半岛, 止于印尼苏门答腊 (Sumatra) 群岛, 与西太平洋成矿域相连 (Jankovic, 1997)。本文所述的东特提斯成矿域意指特提斯在亚洲的部分。它是以新特提斯缝合带为框架, 包括部分古特提斯缝合带, 如伊朗北部的小高加索 (Lesser Caucasus) 缝合带、中国的金沙江缝合带等。地理位置上西起地中海东海岸的土耳其, 止于印尼苏门答腊 (图 1)。

早在板块构造理论提出不久, Dixon 等 (1974) 就试着将特提斯地区的成矿作用与板块构造结合起来。Jankovic (1977) 首次将特提斯成矿域 (TMB) 作为独立的成矿单元来研究, 提出了一条长约 10000km 的钙碱性火山岩浆带。Vassileef 等 (1988) 认识到欧亚大陆南缘的钙碱性火山岩浆带及其赋含的斑岩铜矿的重要性, 认为两者可以作为欧亚大陆南缘的标志。Sengor (1991) 曾将特提斯构造域的研究做过阶段性总结, 还将该域中的岩浆活动分为三种类型, 即俯冲形成的岩浆、碰撞相关的岩浆

注: 本文为国家自然科学基金重点基金 (编号 40730419)、国家基础研究计划 973 项目 (编号 2002CB412600)、国家科技支撑计划项目 (编号 2006BAB01A08)、地质调查项目 (编号 1212010818096) 资助的成果。

收稿日期: 2009-08-15; 改回日期: 2009-10-10; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 张洪瑞, 男, 1982 年生。矿床学专业博士研究生。Email: hongrui_1982@126.com。通讯作者: 侯增谦, 男, 1961 年生。博士, 研究员, 博士生导师。长期从事海底与大陆成矿作用研究。Email: houzengqian@126.com。

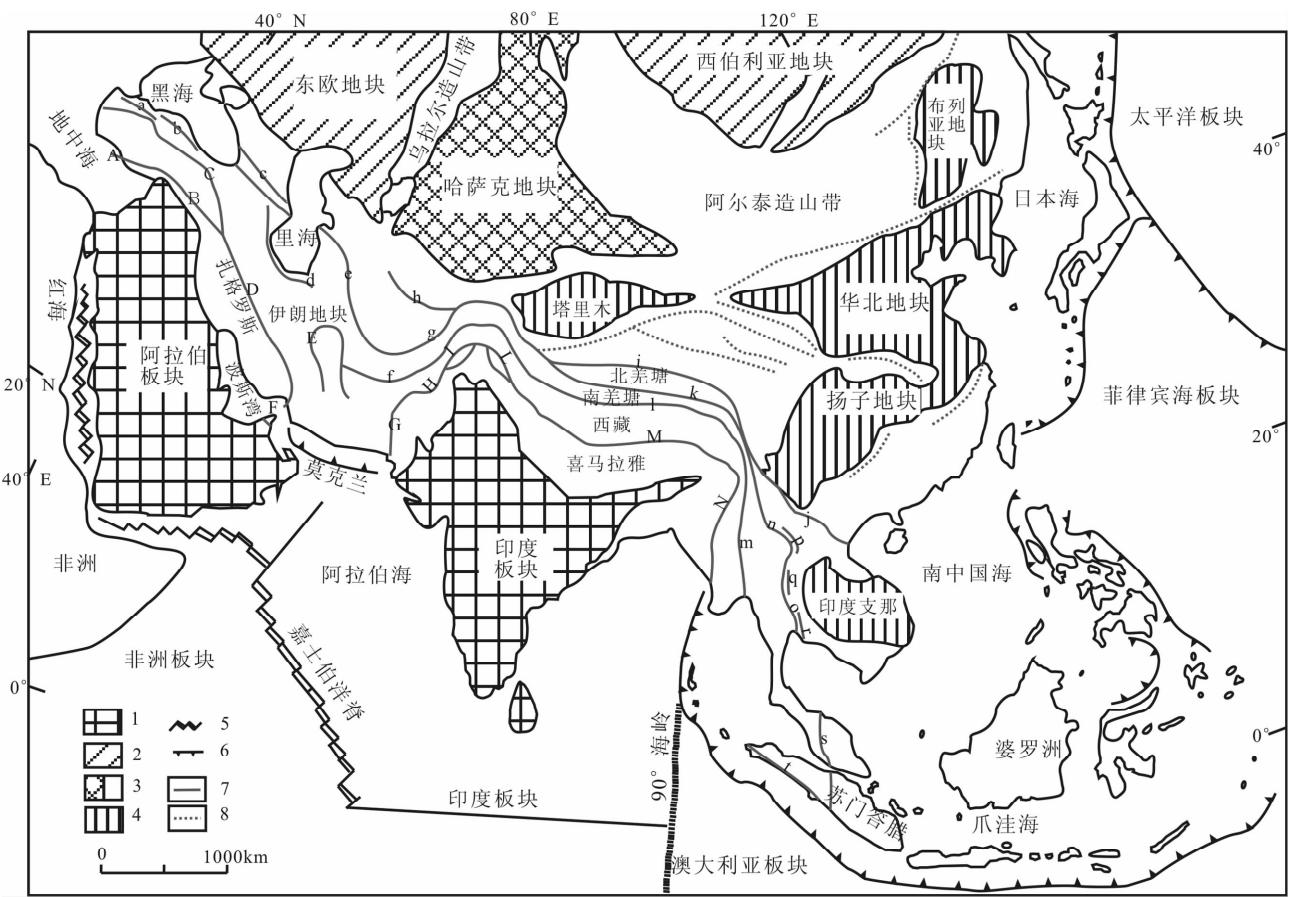


图 1 特提斯构造格架图(据 Sengor,1987;Sengor et al. ,1996;Glennie,2000; Metcalfe,1996、1998、2002; Robertson,2002; 李才等,2006;Sorkhabi et al. ,2008 等综合汇编)

Fig. 1 Tectonic framework of the eastern Tethyan metallogenic domain(modified after Sengor,1987; Sengor et al. ,1996;Glennie,2000; Metcalfe,1996、1998、2002;Robertson,2002;Li et al. ,2006;Sorkhabi et al. ,2008)

古特提斯缝合带:a—北土耳其;b—卡拉卡亚;c—小高加索;d—Talesh-Mashhad;e—Kopet Dagħ;f—Water(Farah-Rud);g—北帕米尔;h—South Ghissar;i—金沙江;j—哀牢山;k—龙木错-双湖;n—澜沧江;o—Inthanon;p—Jinghong;q—Nan-Uttaradit;r—Sra Kao; s—Raub-Bentong;l—班公湖-怒江;m—Shan Boundary;t—Woyla;新特提斯缝合带:A—塞浦路斯;B—比特利斯;C—伊兹密尔;D—扎格罗斯;E—环伊朗中部;F—阿曼;G—Bela;H—Waziristan;I—Quetta;J—Chaman;K—科西斯坦;L—Ladakh;M—雅鲁藏布江;N—缅甸;1—前寒武纪冈瓦那地盾;2—前寒武纪劳亚地盾;3—哈萨克地块和阿尔泰造山带(古生代);4—晚古生代亚洲增生地块;5—现代洋中脊;6—现代俯冲带;7—特提斯成矿域主要缝合带;8—特提斯构造域的其他缝合带

Palaeo-Tethyan sutures: a—North Turkish; b—Karakaya; c—Lesser Caucasus; d—Talesh-Mashhad; e—Kopet Dagħ; f—Water(Farah-Rud); g—North Pamir; h—South Ghissar; i—Jinshajiang; j—Ailaoshan; k—Longmucuo-Shuanghu; n—Lancangjiang; o—Inthanon; p—Jinghong; q—Nan-Uttaradit; r—Sra Kao; s—Raub-Bentong; l—Bangonghu-Nuijiang; m—Shan Boundary; t—Woyla; Neo-Tethysan sutures: A—Cyprus; B—Bitlis; C—Izmir-Ankara-Erzincan; D—Zagros; E—Circum-Central Iran; F—Oman; G—Bela; H—Waziristan; I—Quetta; J—Chaman; K—Kohistan; L—Ladakh; M—Indus-Yarlung-Zangbo; N—Burma; 1—Precambrian cratons of Gondwana; 2—Precambrian cratons of Laurasia; 3—Kazakhstan block and the Altaids(Paleozoic); 4—Continental blocks accreted to Asia(late Paleozoic); 5—Modern ridges; 6—Modern subduction zones; 7—Tethysides with major sutures including Paleo-Tethys and Neo-Tethys; 8—Tethysides with other sutures

和裂解形成的蛇绿岩等(Sengor et al. ,1991)。囿于基础资料的匮乏,前人对特提斯成矿域及斑岩铜矿床只能泛泛而论,无法深入细致研究。

近十几年来,研究资料的逐渐积累使得特提斯构造域的含义、形成和演化等重大问题变得清晰明

朗,为赋存于其中的矿床动力学背景研究提供了基础;西藏地区玉龙、冈底斯、班公湖等重要斑岩铜矿带的发现填补了斑岩铜矿在特提斯成矿域青藏高原段的空白(周宜吉,1980;侯增谦等,2001;曲晓明等,2001;曲晓明等,2006a);与俯冲无关的大陆型斑岩

铜矿的提出丰富了斑岩铜矿的类型(侯增谦等, 2007; Hou et al., 2009)。这些进展为特提斯成矿域中斑岩铜矿的总结工作提供了可能。本文在广泛资料收集的基础上, 将东特提斯成矿域中的斑岩铜矿分为 7 条成矿带和 6 个成矿期, 并结合特提斯演化对其特征进行描述。

1 特提斯构造背景及演化

东特提斯成矿域形成的主要过程可以概括为冈瓦纳大陆的裂解以及欧亚大陆的增生。在这一地球动力演化过程中, 欧亚主动大陆边缘和冈瓦纳被动大陆边缘起了主要的控制作用(Golonka, 2004)。特提斯东部地区构造背景是一个由多陆块、多洋盆和多岛弧相间排布而成的大洋体系(潘桂棠等, 2001, 2004), 其主要演化可分为两个阶段。

1.1 古特提斯形成与沟-弧-盆系统

中泥盆世一晚石炭世, 扬子地块、华北地块、印度支那地块、塔里木地块等开始陆续从冈瓦纳大陆向北漂移, 古特提斯洋开始形成(Metcalf, 1996, 2002)。晚石炭世一早二叠世, 冈瓦纳大陆北缘裂解产生基梅里大陆(Sengor, 1979), 它包括外高加索(Transcaucasia)、伊朗中部、南阿富汗、南帕米尔、羌塘、中缅甸马苏(Sibumasu)等一系列小陆块(Sengor, 1987; Metcalf, 1996, 1997; Ueno, 2003), 打开了新特提斯洋, 向北漂移造成古特提斯洋的消减(Metcalf, 1996, 2002; Bortolotti et al., 2005)。

这次大陆裂解和洋盆消减伴随有大量火山一岩浆活动。在被动大陆边缘, 岩石记录有阿曼的玄武岩, 澳大利亚西侧的辉绿岩、流纹岩等双峰式岩石组合(Veevers, 2004), 冈瓦纳大陆北侧的 Zagros 地区在 P-T 时期一直表现为裂谷环境(Stocklin, 1974), 昌宁孟连洋盆西侧的保山地区发育大陆拉斑玄武岩(从柏林等, 1993)。主动大陆边缘主要形成沟弧盆体系。昌宁孟连洋盆向印度支那板块俯冲, 在印度支那板块边缘形成 Sukhothai 岛弧岩浆系统(Ueno et al., 2001), 弧内发育浅水沉积岩和二叠纪—三叠纪的 I 型花岗岩, 弧后拉张形成 Jinghong-Nan-Sra Kaeo 洋盆(Sone et al., 2008); 与之同时, 昌都—思茅地块从扬子地块上分离, 成为独立块体(Wang et al., 2000; Metcalf, 2002); 二叠纪古特提斯板片俯冲回撤(rollback)使得 Anatolides 从亚欧大陆上裂离, 成为漂浮块体(Moix et al., 2008); 晚二叠世到中三叠世的扩张还在扬子板块西缘形成了甘孜理塘洋(Hou, 1993; Mo et al., 1994; Hou et al.,

2007)。

二叠纪末是弧后洋盆闭合高峰期, Sukhothai 弧后系统萎缩关闭, 残留洋壳形成 Jinghong-Nan-Sra Kaeo 蛇绿岩, 拼贴于印度支那板块之上(Barr et al., 2006; Sone et al., 2008); 昌都—思茅地块也重新拼合到扬子微大陆之上(从柏林等, 1993), 进入前陆盆地演化阶段(潘桂棠等, 1997)。

三叠纪末古特提斯洋盆全面闭合。在特提斯构造域东段, 南羌塘地块与北羌塘地块拼合形成龙木错—双湖缝合带(李才, 1987; 李才等, 2006); 北羌塘地块与扬子地块拼合形成金沙江—哀牢山缝合带(潘桂棠等, 1997; Jian et al., 2008); 中缅甸马苏地块与印度支那板块碰撞, 形成澜沧江(昌宁孟连)—Inthanon-Raub-Bentong 缝合带(Metcalf, 2000; Sone et al., 2008)。同时闭合的还有甘孜理塘小洋盆, 它向西俯冲生成义敦岛弧带, 从此金沙江地区进入碰撞造山阶段(Mo et al., 1994; 侯增谦等, 2004b)。

在特提斯构造域西段, 古特提斯洋向北俯冲, 在伊朗中部地区形成 Sanandaj-Sirjan 钙碱性岩浆弧和 Siah Kuh 花岗岩基(Shahabpour, 2005)。基梅里大陆(包括伊朗中部地块、Alborz、阿富汗地块等; Bagheri et al., 2008)与北侧的东欧地块拼贴形成伊朗北部的小高加索(Lesser Caucasus)缝合带(Guest et al., 2006, 2007; Hassanzadeh et al., 2008)、土耳其北部的 Karakaya 缝合带(Stampfli, 2000)。外高加索地区随后进入碰撞阶段, 伴随有大规模逆冲、变质、抬升和岩浆侵入等地质过程。碰撞时限被限定在 222~210Ma(Horton et al., 2008), 而碰撞形成的山间、前陆盆地一直存在至中侏罗世(Alavi, 1996)。

晚三叠世一晚侏罗世, 拉萨地块、西缅甸地块等由南向北漂移, 造成了古特提斯洋的继续消减和新特提斯洋的形成(Bortolotti et al., 2005)。此时洋盆闭合形成的缝合带有: 西藏地区的班公湖—怒江缝合带(Shi et al., 2008)、缅甸的 Shan Boundary 缝合带、印度尼西亚苏门答腊岛上的 Woyla 缝合带等(Metcalf, 1994, 1997, 1998, 2002)。

侏罗纪—白垩纪, 在特提斯构造域西段, 洋盆持续扩张使原为裂谷环境的 Zagros 地区转为稳定的被动陆缘(Sepehr et al., 2004), 洋盆中的零散陆块沿 Pontides, Transcaucasus 和 Iranian plates 等陆块南缘向北俯冲(Spakman, 1986), 因弧后拉张形成了一系列弧后洋盆, 如大高加索地区的古南里海弧后盆地(Golonka, 2004)、土耳其地区的 Vardar 洋盆

(Stampfli, 2002)。在特提斯构造域东段,兰坪地块、羌塘地块等由弧后盆地转为前陆盆地,沉积环境也逐渐由海相转变为陆相(潘桂棠等,1997)。

1.2 新特提斯构造演化

白垩纪末—古新世初,伊朗 Sanandaj-Sirjan、小高加索、莫克兰等微板块在高加索—里海地区与伊朗—阿富汗板块拼贴(Golonka, 2000)。与此同时,这些微板块南缘也由被动陆缘演变为主动陆缘,印度板块、阿拉伯板块沿此边缘向北与欧亚大陆俯冲拼贴,造成新特提斯洋的消减。非洲大陆的北移推动了新特提斯洋主体洋盆的闭合,但仍残留有部分陆间小洋盆。个别残留洋盆和弧后扩张盆地,如 J-K 弧后系统、南里海盆地、Alborz Basin 和西南黑海盆地里的第三系洋盆等一直延续至今(Golonka, 2004)。

白垩纪末新特提斯洋盆的消减生成了一系列火山岩岩浆弧。在土耳其地区, Vardar 洋盆向北俯冲,在 Pontides 造山带形成一套岛弧相关的钙碱性火山岩岩浆系(Moix et al., 2008)。Vardar 洋盆闭合即是 Izmir-Ankara-Erzincan 缝合带(Moix et al., 2008)。受 Vardar 洋闭合的影响,伊朗 Alborz 地区出现岩浆活动,使得 Pontides 钙碱性岩浆带向东一直延续到 Alborz 西部地区,而 Alborz 东部地区仅表现逆冲、抬升等构造变形,未发育火山活动(Alavi, 1996; Zanchi et al., 2006)。印度板块的北向漂移使得新特提斯洋向欧亚板块下俯冲,在巴基斯坦东北部,生成了科西斯坦(Kohistan)岛弧带(Pivnik et al., 1996);在喜马拉雅地区生成南冈底斯岩岩浆弧(潘桂棠等, 2006)。

在特提斯构造域东段,始新世初,巴基斯坦及相邻地区开始受印度与亚欧大陆碰撞的强烈影响,在 40Ma 左右巴基斯坦北部地区的变质作用和地壳缩短达到顶峰,然后逐渐向南扩展(Searle, 1996)。喜马拉雅地区形成了同碰撞的林子宗火山岩和冈底斯花岗岩基(莫宣学等, 2003),同时碰撞带附近发生了强烈的逆冲和褶皱作用(Yin et al., 2000),这一过程被划分为青藏高原主碰撞阶段(侯增谦等, 2006a; 2006b)。

在特提斯构造域西段,阿拉伯板块仍缓慢地与欧亚大陆汇聚,Zagros 作为阿拉伯板块的被动陆缘(Alavi, 1994; Ramsey et al., 2008)沿 Sanandaj-Sirjan 边缘俯冲,特提斯洋残留的 Pindos 洋不断消减,在伊朗形成 Zagros 缝合带(Dercourt et al., 1993; Golonka, 2004)。

始新世—渐新世,由于印度与欧亚大陆的持续汇聚,青藏高原碰撞造山到了晚碰撞阶段,在 SN 向挤压背景之下,以陆内俯冲、大规模逆冲推覆、走滑断裂系统的发育为特征,导致了区域尺度的地壳缩短及藏东富碱斑岩和碳酸岩-正长岩、藏北钾质-超钾质火山岩的大规模产出(侯增谦等, 2006a; 2006c)。

从渐新世开始青藏高原碰撞造山进入后碰撞阶段,下地壳流动与上地壳缩短作用在藏南地区形成 EW 向延伸的藏南拆离系(STD),而拉萨地体发育 EW 向展布的逆冲断裂系;地壳伸展与裂陷作用(< 18 Ma)形成一系列横切青藏高原的 NS 向正断层系统及其围陷的裂谷系和裂陷盆地(侯增谦等, 2006a; 2006d)。

中中新世,非洲和印度两大陆与欧亚大陆的碰撞继续,Pindos 洋最终闭合。Sanandaj-Sirjan 板块向阿拉伯地台上逆冲,形成 Zagros 逆冲推覆系统(Golonka, 2004; Ramsey et al., 2008)。Anatolian 地区地壳增厚,由于其北部 Izmir-Ankara-Erzincan 断裂带为 WNW 向,南部与阿拉伯板块的边界断裂 Bitlis 为 NE 向,南北汇聚挤压造成 Anatolian 块体向西逃逸(Gursoy et al., 2008)。

晚中新世,阿拉伯与欧亚板块的碰撞在土耳其地区进入后碰撞阶段。钙碱性—碱性岩浆活动遍布 Anatolian 高原地区,岩浆起源为增生杂岩带下面的俯冲板片断离造成岩石圈地幔的减压熔融,这一点与青藏高原伸展型地壳熔融相区别(Sengor et al., 2008)。

2 斑岩铜矿在东特提斯成矿域中的空间分布

东特提斯成矿域中的斑岩铜矿储量丰富,斑岩铜矿带西起土耳其,沿着小高加索山经亚美尼亚到伊朗西北部,在里海以南地区分支,一条直接向东到阿富汗;一条延伊朗中部、南部到阿曼湾,然后在巴基斯坦向北东,通过我国的喜马拉雅,一直到缅甸的蒙育瓦(Monywa),构成了一条世界级规模的巨型斑岩铜矿带(图 2)。伊朗的萨尔切什梅(Sar-Cheshmeh)、松贡(Sungun)和巴基斯坦的赛因德格(Saindak)等矿床都是世界级超大型斑岩铜矿。

按斑岩铜矿床的特征、空间分布及其构造背景,可将东特提斯成矿域中的斑岩矿床分为 7 条铜矿带(图 2, 表 1)。除此之外,中南半岛、土耳其 Anatolides 地区还有一些零散矿点,因为资料有限,

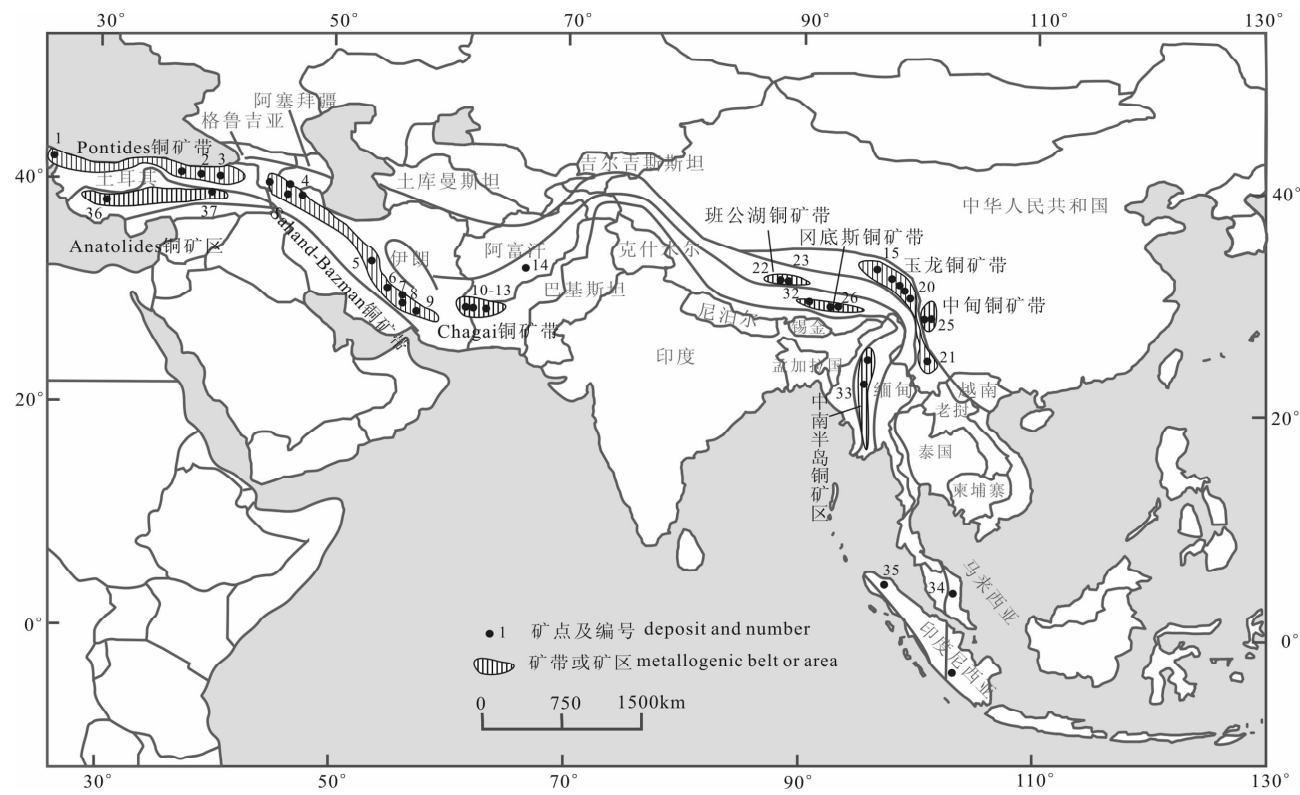


图 2 斑岩铜矿床在东特提斯成矿域中的空间分布图(据 Singer et al. ,2005;施俊法等,2006 等)

Fig.2 Spatial distribution of porphyry copper deposits in the eastern Tethyan metallogenic domain (modified after Singer et al. ,2005;Shi et al. ,2006)

无法划分或归并成带,本文只对矿点做简单介绍。

2.1 土耳其 Pontides 铜矿带

Pontides 斑岩铜矿带(也称北土耳其成矿带, Yavuz et al. ,1999)位于土耳其北部 Pontides 造山带中,南部以 Izmir-Ankara-Erzincan 缝合带与 Anatolides 造山带相隔。该造山带在中生代一直位于活动大陆边缘,广泛分布与弧相关的火成岩,西接 Balkanic 造山带,东连 Caucasus 造山带。由 Rhodope-Strandja、Istanbul-Zonguldak、Sakarya 三个微陆块残片组成(Moix et al. ,2008)。

白垩纪末 Vardar 洋北向俯冲,在 Pontides 造山带上形成了一条岛弧性质的钙碱性火山岩浆带(Nakov et al. , 2002;Moix et al. ,2008),类似于冈底斯弧岩浆带。斑岩铜矿即产于这条火山岩浆带中,矿床类型为斑岩铜钼矿,其西部 Rhodope-Strandja 区伴生 W(Ohta et al. , 1988),东部 Sakarya 区伴生 Au(Yigit,2006)。成矿时代为晚白垩世到古新世(Yavuz et al. ,1999)。同时该带内还产有众多小型-中型的多金属脉型 Cu-Pb-Zn 矿床(Yavuz et al. ,1999)。

Pontides 造山带 Rhodope-Strandja 区内的斑岩

铜矿带向西延伸与保加利亚的 Srednogorie 相连,都属 Alpine-Balkano-Carpathian-Dinaride 斑岩铜矿带(Nakov et al. , 2002;Yigit,2006)。其构造背景、赋矿围岩、矿化蚀变等特征都基本一致,不同的是保加利亚地区斑岩岩体侵位时代较早(91~86Ma, Strashimirov et al. , 2002)。结合本区西部 Derekoy 矿床($76.7 \pm 3\text{Ma}$, Ohta et al. ,1988)和东部 Salikvan 矿床($64.5 \pm 1.7\text{Ma}$, Yavuz et al. , 1999)的成矿年龄,可以看出 Alpine-Balkano-Carpathian-Dinaride 斑岩铜矿带具有从西向东成矿年龄逐渐变年轻的特征,可能与俯冲启动时间有关系。Pontides 造山带向东延伸至伊朗北部的 Alborz 地区西部,Alborz 东部地区仅表现逆冲、抬升等构造变形,未发育火山活动(Alavi, 1996; Brunet et al. ,2003)。

此带上斑岩铜矿床数目可观,相对集中在西部的 Thrace 地区 Rhodope-Strandja 微陆块和东部的 Artvin 地区 Sakarya 微陆块之上(图 3)。主要矿床有 Derekoy (Ohta et al. , 1988)、Güzelyayla、Salikvan(Moore et al. ,1986; Yavuz et al. ,1999)等。

表 1 东特提斯成矿域中主要斑岩铜矿床的地质特征

Table 1 Geology and mineralization of porphyry copper deposits in the Eastern Tethyan Metallogenic Domain

序号	矿床名称	国家地区	金属组合	矿床类型	吨位	品位	构造背景	母岩	围岩	蚀变	年龄	文献出处
1	Derekoy	土耳其	Cu-Mo-W	斑岩铜钼矿	221Mt	Cu:0.24% Mo:0.03%	Pontides 造山带 Rhodope-Strandja 区	石英闪长斑岩和英云闪长斑岩	前白垩纪变质岩	钾化、绢云母化、青磐岩化	76.7 ~ 70.9Ma	Ohta et al., 1988
2	Güzelyayla	土耳其	Cu	斑岩铜钼矿	186Mt	Cu:0.3%	Pontides 造山带 sakarya 区				古新世	Singer et al., 2005
3	Salikvan	土耳其东北部 Artvin 市西南	Cu-Mo	斑岩铜钼矿			Pontides 造山带 sakarya 区	花岗闪长斑岩	晚白垩纪玄武岩、安山岩、英安岩及火山碎屑岩	钾化、绢云母化、青磐岩化	64.5 ± 1.7 Ma	Yavuz et al., 1999; Singer et al., 2005
4	松贡 (Sun Gun)	伊朗 Azarbaijan 省	Cu-Mo	斑岩—矽卡岩矿床	650 Mt	Cu:0.76% Mo:0.01%	中伊朗 Sahand-Bazman 中新世火山岩浆带	早期的二长岩/石英二长岩和晚期的闪长岩/花岗闪长岩两个阶段。	白垩纪石灰岩和始新世安山质凝灰岩、集块岩	早期主要是钾化和青磐岩化,晚期为绢云母化、硅化和泥化	20Ma	Cooke et al., 2005; Mutschler, 1999
5	Kale Kafi	伊朗	Cu-Mo	斑岩铜矿	245Mt	Cu:0.26% Mo:0.026%	中伊朗 Sahand-Bazman 中新世火山岩浆带					Singer et al., 2005
6	Ali-Abad	伊朗 Yazd 省	Cu-Mo-Ag	斑岩铜矿	40Mt	Cu:0.73% Mo: 0.0059% Ag:19g/t	中伊朗 Sahand-Bazman 中新世火山岩浆带	碱性花岗岩、花岗闪长岩和石英二长闪长岩	始新世英安质-流纹质凝灰岩	绢云母化、泥化、青磐岩化	16Ma	Zarasvandi et al., 2005, 2007
7	Darrehzar	伊朗 Yazd 省	Cu-Mo-Au-Ag	斑岩铜矿	31.7 Mt	Cu:0.722% Mo:0.005% Ag:1g/t	中伊朗 Sahand-Bazman 中新世火山岩浆带	石英闪长岩、石英二长岩、英云闪长岩和花岗岩	始新世凝灰岩、白垩纪灰岩	钾化、绢云母化、泥化、青磐岩化	16Ma	Zarasvandi et al., 2005, 2007
8	Meiduk	伊朗	Cu	斑岩铜矿	140Mt	Cu:0.85%	中伊朗 Sahand-Bazman 中新世火山岩浆带				12 ~ 11Ma	Singer et al., 2005
9	萨尔切什梅 (Sar-Cheshmeh)	伊朗 Kerman 省	Cu-Mo-Au-Ag	斑岩铜矿	1200Mt	Cu:1.2% Mo:0.03% Au:0.27g/t Ag:3.9 g/t	中伊朗 Sahand-Bazman 中新世火山岩浆带	闪长岩到花岗闪长岩,英安岩及相关斑岩,安山岩及相关岩墙	早第三纪火山沉积岩,包括安山岩、凝灰岩、熔结凝灰岩和集块岩。	早期为中心钾化,外围青磐岩化,后期又叠加了绢云母化。	12.2Ma	Cooke et al., 2005; Samani, 1998; Waterman et al. 1975

续表 1

序号	矿床名称	国家地区	金属组合	矿床类型	吨位	品位	构造背景	母岩	围岩	蚀变	年龄	文献出处
10	赛因德格(Sain-dak)	巴基斯坦 Balochistan 省	Cu-Au	斑岩铜金矿	440Mt	Cu:0.41% Au:0.5 g/t	Chagai 钙碱性火山岩浆带	英云闪长斑岩体	矿区南部为渐新世粉砂岩和页岩;北部为始新世火山集块岩、凝灰岩	从内向外钾化、绢云母化、青磐岩	21Ma	Ahmad, 1992; Sillitoe, 1977, 1979
11	雷科迪克(Reko Diq)	巴基斯坦	Cu-Au	斑岩铜金矿	855Mt	Cu:0.65% Au:0.33g/t	Chagai 钙碱性火山岩浆带				中新世	Cooke et al. , 2005
12	Koh-i-Dalil	巴基斯坦	Cu-Au	斑岩铜金矿			Chagai 钙碱性火山岩浆带	英云闪长岩、二长岩、花岗闪长岩和英安斑岩	中新世火山集块岩和熔岩	从内到外:钾化-绢云母化-青磐岩化		Ahmad, 1992
13	Dasht-e-Kain	巴基斯坦	Cu-Au	斑岩铜金矿	350Mt	Cu:0.3% Mo:0.001%	Chagai 钙碱性火山岩浆带	渐新世闪长岩体	晚白垩世 Sin-jrani 组火山集块岩、凝灰岩	从内到外:钾化-绢云母化-泥化-青磐岩化	21Ma	Ahmad, 1992; Singer et al. , 2005
14	Kundalyan	阿富汗	Cu-Mo-Au	斑岩—矽卡岩矿床	Cu: 4Mt Mo: 1.8 Mt Au: 1.6t	Cu:1.21% Mo:0.144% Au: 0.9 g/t						Orris et al. , 2002
15	纳日贡玛	中国青海	Cu-Mo	斑岩钼铜矿床	Cu: 0.25 Mt	Cu: 0.33% Mo:0.079%	昌都思茅地块上大型走滑断裂附近	始新世黑云母花岗岩	P ₂ 中基性火山熔岩	石英绢云母化、青磐岩化、泥化	43.3Ma	杨志明等, 2008b; 王召林等;2008
16	玉龙	中国西藏	Cu-Mo	斑岩铜钼矿	Cu: 6.5 Mt	Cu: 0.99% Mo:0.028%	昌都思茅地块上大型走滑断裂附近	二长花岗岩、石英二长岩	T ₃ 结晶灰岩	钾化、石英绢云母化、青磐岩化、高级泥化	41.2Ma	Hou et al. , 2003, 2006, 2007
17	扎那尕	中国西藏	Cu-Mo-Au	斑岩铜钼矿	Cu: 0.3 Mt	Cu: 0.36% Mo: 0.03% Au:0.03 g/t	昌都思茅地块上大型走滑断裂附近	正长花岗岩、二长花岗岩	T ₃ 砂质泥岩	钾化、石英绢云母化、青磐岩化、矽卡岩化	38.5Ma	Hou et al. , 2003, 2006, 2007

续表 1

序号	矿床名称	国家地区	金属组合	矿床类型	吨位	品位	构造背景	母岩	围岩	蚀变	年龄	文献出处
18	莽宗	中国西藏	Cu-Mo-Au	斑岩铜钼矿	Cu: 0.25 Mt	Cu: 0.34% Mo: 0.03% Au: 0.02 g/t	昌都思茅地块上大型走滑断裂附近	二长花岗斑岩	T ₃ 砂质泥岩	钾化、石英绢云母化、青磐岩化、矽卡岩化	37.6Ma	Hou et al., 2003, 2006, 2007
19	多霞松多	中国西藏	Cu-Mo-Au	斑岩铜钼矿	Cu: 0.5 Mt	Cu: 0.38% Mo: 0.04% Au: 0.06 g/t	昌都思茅地块上大型走滑断裂附近	碱长花岗岩、二长花岗斑岩	T ₃ 砂质泥岩	钾化、石英绢云母化、青磐岩化、矽卡岩化	37.5Ma	Hou et al., 2003, 2006, 2007
20	马拉松多	中国西藏	Cu-Mo-Au	斑岩铜钼矿	Cu: 1.0 Mt	Cu: 0.44% Mo: 0.14% Au: 0.06 g/t	昌都思茅地块上大型走滑断裂附近	二长花岗斑岩、黑云花岗斑岩	T ₁ 流纹岩	钾化、石英绢云母化、青磐岩化、矽卡岩化	36.9Ma	Hou et al., 2003, 2006, 2007
21	马厂箐	中国云南	Cu-Mo-Au	斑岩铜钼金矿	Cu: 0.25 Mt	Cu: 0.64% Mo: 0.08% Au: 0.35 g/t	昌都思茅地块上大型走滑断裂附近	花岗岩、二长花岗岩、煌斑岩	O ₁ -D ₁ 灰岩、砂岩	钾化、绢云母化、矽卡岩化、高级泥化	35.8±1.6 Ma	Hou et al., 2006; 2007
22	多不杂	中国西藏	Cu-Au	斑岩铜金矿	Cu: 约 2Mt	Cu 0.94% Au 0.21 g/t	班公湖—怒江缝合带北侧的多不杂构造岩浆弧	石英闪长玢岩、花岗闪长斑岩	滨海相碎屑岩夹火山岩	钾硅化+绢英岩化带、绢英岩化带和黄铁矿化—角岩化带。	127.8±2.6Ma	曲晓明等, 2006; 李光明等, 2007
23	尕尔穷	中国西藏	Cu-Au	斑岩—矽卡岩铜金矿			班公湖—怒江缝合带北侧的多不杂构造岩浆弧				112.0±2.3Ma	曲晓明等, 2006
24	雪鸡坪	中国云南	Cu	斑岩铜矿	Cu: 0.30 Mt	Cu: 0.60%	三叠纪义敦岛弧南部中甸弧	闪长斑岩、二长斑岩		绢云母化、青磐岩化		Hou et al., 2007
25	普朗	中国云南	Cu	斑岩铜矿	Cu: 1.14 Mt	Cu 0.57% Mo 0.004% Au 0.18 g/t	义敦岛弧南部中甸弧	石英闪长玢岩、石英二长斑岩小岩株	T ₃ 板岩、绢云板岩、安山岩、变质砂岩	中心向外依次为强硅化带-硅化钾化带-绢英岩化带-青磐岩化带	213±3.8Ma	曾普胜等, 2006
26	甲马	中国西藏	Pb+Zn+Cu±Au	斑岩铜钼矿	Cu: >1 Mt	Cu: 1.16% Pb: 3.48% Zn: 1.04% Mo: 0.024% Au: 0.5×10 ⁻⁶	冈底斯火山岩岩浆弧	二长花岗岩	K ₁ -J ₂ 砂岩、板岩、灰岩	钾化、石英绢云母化、青磐岩化、矽卡岩化	15.18±0.98 Ma	Hou et al., 2008

续表 1

序号	矿床名称	国家地区	金属组合	矿床类型	吨位	品位	构造背景	母岩	围岩	蚀变	年龄	文献出处
27	驱龙	中国西藏	Cu-Mo	斑岩铜钼矿	Cu: 7.1 Mt	Cu: 0.5 % Mo: 0.03% ~ 0.06 %	冈底斯火山岩浆弧	二长花岗岩、花岗岩	J ₂ 火山凝灰岩、流纹岩、灰岩、板岩	钾化、石英绢云母化、青磐岩化	15.99 ± 0.32Ma	Hou et al., 2008; 杨志明等, 2008a
28	拉抗额	中国西藏	Cu ± Mo	斑岩铜钼矿	Cu: > 0.1 Mt	Cu: 0.13% ~ 0.49 %	冈底斯火山岩浆弧	花岗闪长岩、二长花岗岩	K ₁ 火山碎屑岩、灰岩、花岗岩	钾化、石英绢云母化、青磐岩化	13.6 ± 0.1 Ma	Hou et al., 2008
29	南木	中国西藏	Cu-Mo	斑岩铜钼矿	Cu: > 0.2 Mt	Cu: > 0.3 %	冈底斯火山岩浆弧	花岗闪长岩、二长花岗岩	古新世碰撞花岗岩	钾化、石英绢云母化、青磐岩化	14.76 ± 0.60 Ma	Hou et al., 2008
30	厅宫	中国西藏	Cu-Mo	斑岩铜钼矿	Cu: > 1 Mt	Cu: > 0.5 %	冈底斯火山岩浆弧	石英二长花岗岩、花岗岩	古新世碰撞花岗岩	钾化、石英绢云母化、青磐岩化、泥化	15.49 ± 0.36 Ma	Hou et al., 2008
31	冲江	中国西藏	Cu-Mo	斑岩铜钼矿	Cu: > 1 Mt	Cu: > 0.45 %	冈底斯火山岩浆弧	二长花岗岩	古新世碰撞花岗岩	钾化、石英绢云母化、青磐岩化、泥化	14.00 ± 0.43 Ma	Hou et al., 2008
32	白容	中国西藏	Cu-Mo	斑岩铜钼矿	Cu: > 0.4 Mt	Cu: 0.73 %	冈底斯火山岩浆弧	二长花岗岩	古新世碰撞花岗岩	钾化、绢云母化、泥化		Hou et al., 2008
33	蒙育瓦 (Mony-wa)	缅甸	Cu-Au	斑岩铜金矿	1700 Mt	Cu: 0.37%	雅鲁藏布江缝合带和密支那碰撞带之间	黑云母斑状高 K 闪长岩			新生代	施俊法等, 2006; Singer et al., 2005
34	Mengpur	马来西亚	Cu-Au	斑岩铜金矿	45Mt	Cu: 1.8% Au: 0.6 g/t					早三叠世	Singer et al., 2005
35	Tangse	印度尼西亚苏门答腊	Cu-Mo	斑岩铜矿	600Mt	Cu: 0.15% Mo: 0.02%	Woyla 缝合带附近	石英闪长岩	始新世角闪闪长岩、石英闪长岩	钾化、青磐岩化、石英绢云母化	9Ma	Van Leeuwen et al., 1987; Singer et al., 2005
36	Kisladag	土耳其	Cu-Mo-Au	富金高钼斑岩矿床	135Mt	Au: 1.16 g/t	Anatolides 造山带		晚第三纪粗安岩			Sillitoe, 2002; Yilmaz et al., 2003a
37	Copler	土耳其	Cu-Mo	斑岩铜金矿	33 Mt	Au: 2.1 g/t	Anatolides 造山带	已矽卡岩化的早侏罗世灰岩	古新世花岗闪长岩、石英二长岩、灰岩			Yigit, 2006

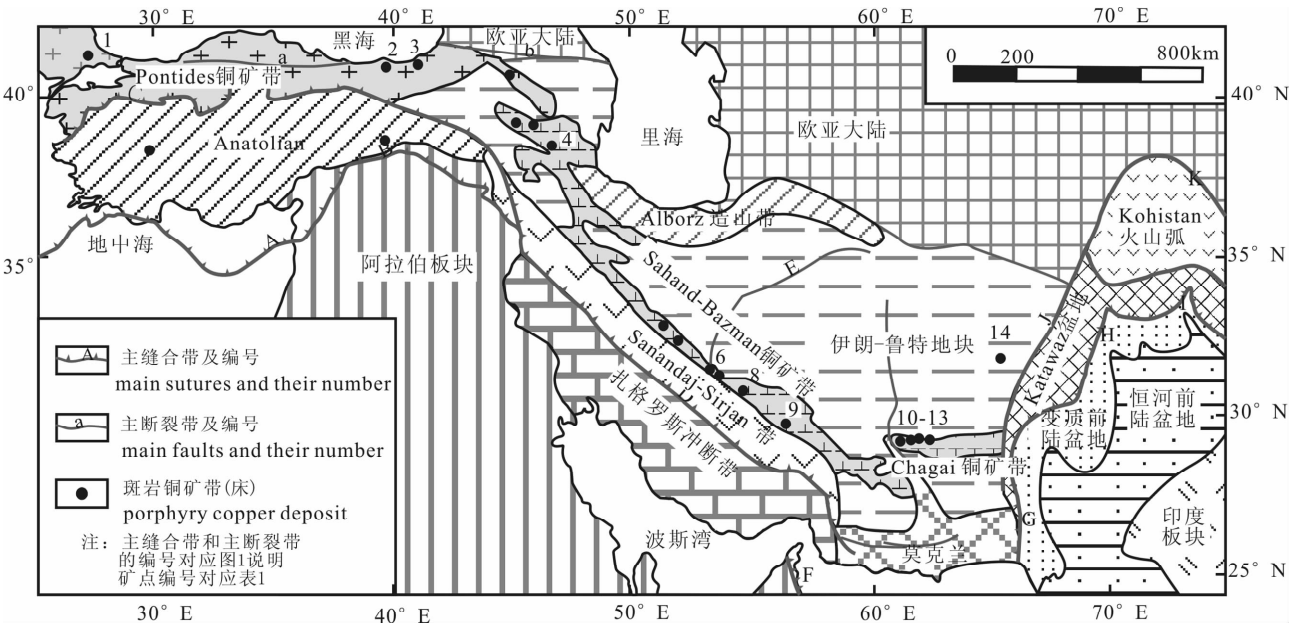


图 3 西亚地质构造及斑岩铜矿(据 Stocklin, 1974; Sillitoe, 1978; Pivnik et al., 1996; Brunet et al., 2003; Zanchi et al., 2006; Moix et al., 2008; Bagheri et al., 2008 综合简化)

Fig. 3 Tectonic framework and spatial distribution of porphyry copper deposits in West Asia(modified after Stocklin,1974; Sillitoe, 1978; Pivnik et al., 1996; Brunet et al., 2003; Zanchi et al., 2006; Moix et al., 2008; Bagheri et al., 2008)

2.2 伊朗中部 Sahand-Bazman 铜矿带

伊朗中部 Sahand-Bazman 斑岩铜矿带赋存在新生代 Sahand-Bazman 火山岩浆带中 (Stocklin, 1974; Hezarkhani, 2006b)。该火山岩浆带又称 Urumieh-Dokhtiar 火山岩带 (Agard et al., 2005)、伊朗中部火山岩浆带 (Jankovic, 1984; Zarasvandi et al., 2005; Shahabpour, 2005), 属于扎格罗斯 Zagros 造山带的组成部分 (Alavi, 1994; Zarasvandi et al., 2005), 从土耳其东部北西向延伸到伊朗的南部。岩浆岩侵入到已经拼合的伊朗中部地块中, 岩浆活动延续较长, 从始新世至今都有 (Zarasvandi et al., 2007), 但岩浆活动高峰期介于渐新世—中新世之间 (Agard et al., 2005), 与三江地区含 Cu 钾质岩浆活动相当 (Hou et al., 2003)。与成矿有关的是中新世钙碱性侵入杂岩体 (Jankovic, 1984; Hezarkhani, 2006b), 部分含矿岩体就位受走滑断裂及其派生构造控制 (如 Darreh-Zerreshk 矿床, Zarasvandi et al., 2005)。带内多为平缓的西倾褶皱, 含矿岩体沿背斜轴部侵位 (Waterman et al., 1975)。沿 Sahand-Bazman 火山岩浆带上连续分布有 Sungun (Mutschler et al., 1999; Hezarkhani et al., 1999; Calagari, 2003, 2004a, b)、Kale Kafi、Ali-Abad、Darrehzar (Zarasvandi et al., 2007; Atapour et al., 2007)、Meiduk 和 Sar-Cheshmeh (Hezarkhani,

2006a) 等一系列铜矿床, 其中有萨尔切什梅 (Sar-Cheshmeh) 和松贡 (Sungun) 为世界著名的斑岩铜矿。

综合该带上的矿床资料, Sahand-Bazman 斑岩铜矿带古新世以来普遍发育始新世、中新世、第四纪等三期岩浆活动 (Waterman et al., 1975; Hezarkhani et al., 1998; Zarasvandi et al., 2007), 其中第二期中新世高 K 钙碱性侵入岩赋存斑岩铜矿。成矿年龄有从北西向南东逐渐变小的趋势 (Samani, 1998)。

2.3 巴基斯坦 Chagai 铜矿带

巴基斯坦已发现的斑岩铜矿都是在 Chagai 钙碱性岩浆侵入体中 (Perello et al., 2008), 该侵入岩体是巴基斯坦西南部连续出露最大的岩浆岩体, 由近于平行的三部分地质体组成, 从北向南依次为: 未变形的 Chagai Hills 山; 东西向褶皱的 Mirjawa-Dalbandin 凹陷; 强变形并且含侵入体的 Ras Koh Range 山 (Breitzman et al., 1983; Ahmad et al., 2005)。该带被认为是伊朗 Sahand-Bazman 斑岩铜矿带的延伸, 两者在中间被莫克兰磨拉石截断 (Berberian et al., 1982; Jankovic et al., 1987; Bagheri et al., 2008); 北东向延伸还有晚白垩世—第三纪的安山质、花岗闪长质小岩株, 断续出露直至消失 (Ahmad, 1992)。成矿类型为斑岩铜金矿, 主

要矿床有赛因德格(Saindak, Sillitoe et al., 1977; Sillitoe, 1978)、雷科迪克(Reko Diq, Perello et al., 2008)、Koh-i-Dalil、Dasht-e-Kain 等。

2.4 中国玉龙铜矿带

玉龙斑岩铜矿带总体上处于昌都—思茅陆块上,夹持于金沙江缝合带和澜沧江缝合带之间(图4),北起青海南部,产有纳日贡玛斑岩铜钼矿;经藏东江达—芒康地区玉龙斑岩铜矿带;南延至滇西大理马厂箐铜钼金矿,超过 300km 长,15~30km 宽,由 20 多个二长花岗斑岩组成(侯增谦等,2007)。大多数岩体浅成侵位(1.5~3km)于三叠纪地层中,属于高 K 的钙碱质、钾玄质系列(Gu et al., 2003),岩石类型为花岗斑岩—二长花岗斑岩—二长斑岩和少量正长斑岩,类似埃达克岩(侯增谦等,2004c),富集大离子亲石元素 LILE 和轻稀土元素 LREE,亏损高场强元素 HFSE, Sr-Nd 同位素组成特征表明岩浆来源于加厚地壳底部的壳-幔过渡带(Hou et al.,

2007)。岩体就位受古新世以来印度与欧亚大陆碰撞形成的 NNW 向大规模走滑断裂的控制,与走滑拉分盆地共生(Hou et al., 2003)。

含矿岩体不同程度地发育爆破角砾岩筒,其偏酸性的花岗质斑岩群发育 Cu 或 Cu-Mo 矿,而偏中性的正长斑岩或二长斑岩群则发育 Au 或 Cu-Au 矿。Cu 或 Cu-Mo 矿床中的伴生 Au,主要出现于富含磁铁矿的钾硅酸盐蚀变带;而斑岩 Au 矿床不同程度地伴生 Cu,含 Au 建造主要是富铁建造(侯增谦等,2006c)。

大量测年工作表明,区域岩浆在应力脉动式松弛的构造转化背景下发生多期次侵位,侵位高峰分别集中在 52, 41 和 33Ma(Peng et al., 1998; Liang et al., 2006),含矿岩浆活动主要集中于 41~30Ma(Liang et al., 2006);成矿年龄与之相当,介于 40~30 Ma 之间(Wang et al., 2005; 郭利果等, 2006; 曾普胜等, 2006),成矿高峰集中于三个峰期,分别为

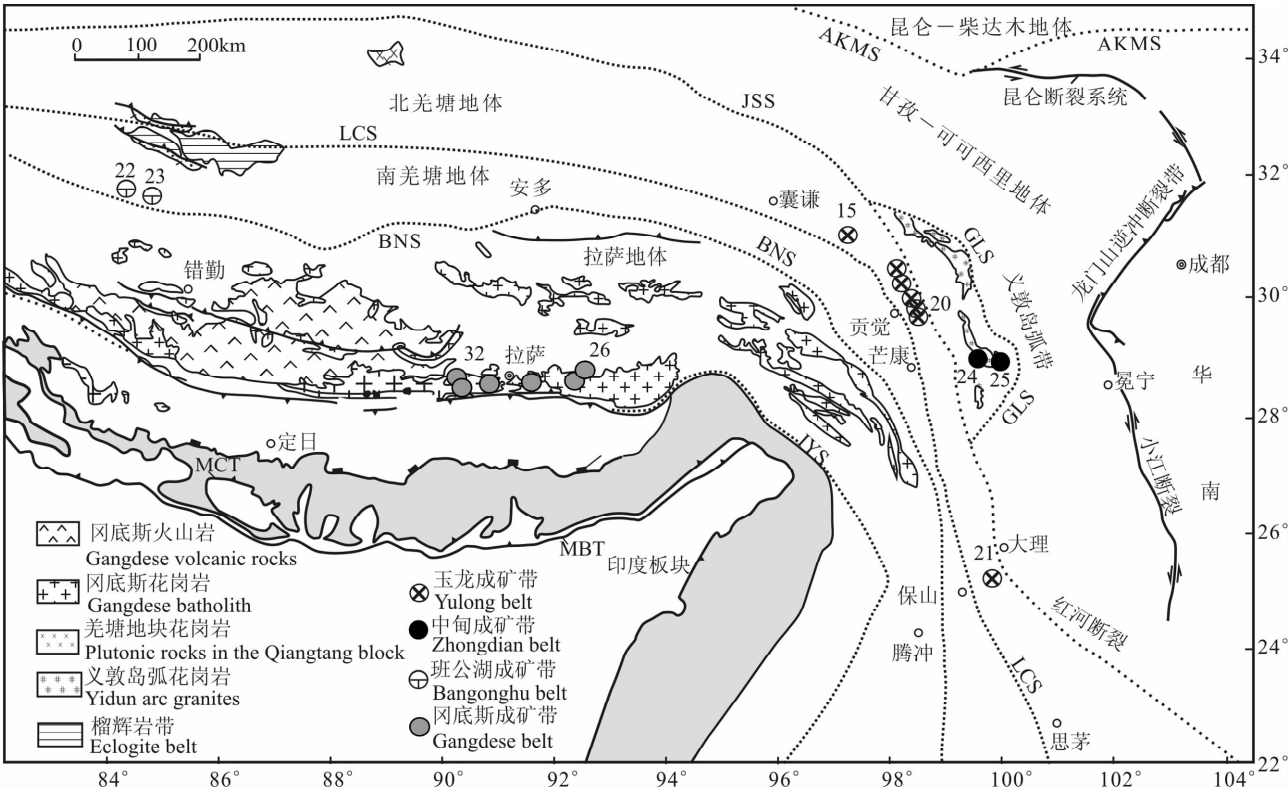


图 4 青藏高原构造格架及斑岩铜矿分布(Yin et al., 2000; 侯增谦等, 2006a; 李才等, 2006; 曾普胜等, 2006a; 曲晓明等, 2006a; 芮宗瑶等, 2006)

Fig. 4 Tectonic framework and spatial distribution of porphyry copper deposits in the Himalayan-Tibetan orogen(modified after Yin et al., 2000; Hou et al., 2006a; Li et al., 2006; Zeng et al., 2006a; Qu et al., 2006a; Rui et al., 2006)

MBT—主边界逆冲断裂; MCT—主中央逆冲断裂; IYS—印度河-雅鲁藏布江缝合带; BNS—班公湖-怒江缝合带;

JSS—金沙江缝合带; GLS—甘孜-理塘缝合带; LCS—龙木错-澜沧江缝合带; AKMS—阿尼玛卿缝合带

MBT—Main Boundary Thrust; MCT—Main Central Thrust; IYS—Indus-Yalu suture; BNS—Bangong-Nujiang suture;

JSS—Jinshajiang suture; GLS—Ganzi-Litang suture; LCS—Longmuco-Lancangjiang suture; AKMS—Animaqing suture

40Ma, 36 Ma 和 32Ma (Hou et al., 2006)。成矿作用发生在晚碰撞期构造转化环境之压扭/张扭转换阶段(侯增谦等, 2006a)。

2.5 中国中甸铜矿带

中甸铜矿带位于云南西北部, 赋存于义敦岛弧带南部的中甸弧内, 为晚三叠世甘孜-理塘洋向西俯冲形成(图 4, 侯增谦等, 2004b)。义敦岛弧造山带夹持于西侧羌塘地体、北东侧松潘-甘孜地体和南东侧的华南(扬子)地块之间, 东以甘孜-理塘缝合带为界, 西以金沙江缝合带为限, 北西向延伸千余千米。其火山岛弧分南北两段, 北段发育双峰式火山岩, 显示张性弧特征; 南段中甸弧为压型弧, 缺失双峰式岩石组合, 大量发育由石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩和白云母花岗岩等构成的中酸性岩浆系统(侯增谦等, 2004b)。中甸弧深成岩体 Hf 同位素特征显示为非单一段元 Hf 组成, 这有可能是岩浆经过了混合作用; 也有可能是岩浆形成时就有多种同位素组成, 比如说俯冲带上的沉积岩熔融, 而这两种可能性都可以用岩浆弧的构造背景来解释(Reid et al., 2007)。

中甸岛弧带中分布最广的是三叠系火山-沉积岩系, 火山岩为以安山岩为主的钙碱性系列火山岩(Hou et al., 2007)。与斑岩铜矿关系密切的岩浆岩主要是印支期浅成-超浅成相侵入体, 岩石组合为闪长玢岩-石英闪长玢岩-二长斑岩-石英二长斑岩-花岗斑岩。斑(玢)岩多呈小岩株、岩瘤、岩墙等成群、成带产出, 受向断裂带控制形成东、西 2 个斑岩带(曾普胜等, 2003, 2004)。西斑岩带分布于烂泥塘-雪鸡坪-阿热一带, 岩性主要为石英闪长玢岩和闪长玢岩, 岩体年龄为 249.0~237.5Ma(曾普胜等, 2006a), 雪鸡坪中型斑岩铜矿床即位于此带中部。东斑岩带分布于欠虽-懒中一带, 岩性为石英闪长玢岩、石英二长闪长玢岩和花岗斑岩, 岩体年龄介于 223.8~203Ma 之间(范玉华等, 2006; 林清茶等, 2006; 冷成彪等, 2008), 代表矿床有普朗斑岩铜矿。

2.6 中国西藏班公湖铜矿带

班公湖铜矿带是青藏高原近年来新发现的斑岩铜矿带之一, 目前工作程度较低, 为重要成矿远景区。大地构造上位于班公湖-怒江缝合带北侧的多不杂构造岩浆弧中。已发现多不杂和尕尔穷 2 处斑岩矿床, 多不杂矿区铜资源量达 200 余万吨, 伴生金, 为大型斑岩型铜金矿床; 尕尔穷矿区主要由斑岩与围岩接触带上的矽卡岩型铜矿体构成, 为斑岩-矽卡岩型矿床, 铜储量已接近中型(曲晓明等, 2006a;

芮宗瑶等, 2006)。

班公湖-怒江缝合带扩张发生在石炭纪一早三叠世, 俯冲消减主要在中晚三叠世开始, 至晚侏罗世—白垩纪碰撞缝合(Yin et al., 2000; Shi et al., 2008), 多不杂构造岩浆弧成岩时代即为白垩纪中期(曲晓明等, 2006a)。多不杂富金斑岩铜矿含矿斑岩为石英闪长玢岩、花岗闪长斑岩, 呈岩株状产出, 侵位于中侏罗统雁石坪群(滨海相碎屑岩夹火山岩)和早白垩统美日切组(火山碎屑岩夹安山玢岩)地层中(李光明等, 2007)。岩体矿化为细脉-浸染状, 含矿斑岩全岩矿化, 少量矿化产于围岩中, 成矿为铜-金组合, 为典型富金斑岩铜矿。具有典型的斑岩铜矿矿石特征和蚀变分带特点, 围绕斑岩体从岩体中心向外, 可以划分出三个主要的蚀变带, 依次为钾硅化+绢英岩化带、绢英岩化带和黄铁矿化-角闪岩化带。矿床以岩体内部和外部均发育强烈的磁铁矿化蚀变、而外围青磐岩化带不发育等特征有别于国内其他斑岩铜矿(余宏全等, 2006)。

2.7 中国西藏冈底斯铜矿带

冈底斯斑岩铜矿带产于雅鲁藏布江缝合带北侧、拉萨地体南缘的冈底斯构造-岩浆带中。其西起尼木县冲江, 东至工布江达县吹败子, 东西长约 400 km, 南北宽约 50 km, 已发现 1 处超大型斑岩铜矿床(驱龙), 3 处大型斑岩铜矿床(厅宫、冲江、甲马), 4 处中-小型铜矿(白荣、南木、拉抗俄、帮浦)及一系列矿点和矿化点(Qu et al., 2004; Hou et al., 2008)。这些矿床和矿点整体上东西成带, 平行于冈底斯逆冲带展布; 局部南北成串, 严格受 SN 向正断层控制(侯增谦等, 2006d), 构成著名的冈底斯中新世斑岩铜矿带(图 4)。

含矿斑岩规模一般小于 1 km², 零星孤立分布, 侵位于古新世—渐新世末同碰撞花岗岩基之中。岩性主要为二长花岗斑岩、石英二长斑岩, 少数为花岗闪长斑岩、花岗斑岩等, 属钾玄岩至高钾钙碱性岩系。地球化学上以富集大离子不相容元素 LILE、亏损高场强元素 HFSE 和重稀土元素 HREE 为特点(曲晓明等, 2001); 稀土元素则为轻、重稀土分馏明显的平滑右倾型式, 显示出埃达克岩浆亲和性(侯增谦等, 2001)。Sr-Nd 同位素组成以及越来越多的地质事实表明, 冈底斯含矿斑岩可能来自加厚的新生下地壳的部分熔融(Hou et al., 2004; 侯增谦等, 2004a; 2005)。岩浆活动发生在 11.2~19.7 Ma, 高峰期为 16Ma, 与东西向伸展(10~18Ma)以及随后的南北向裂谷系的时代相符合。成矿年龄为 13.8

~16.0Ma(侯增谦等,2003;曲晓明等,2006b;Hou et al.,2008),说明成矿时代与斑岩体的侵位时代基本一致。

地球化学和地球物理数据表明,古新世—渐新世,幔源镁铁质岩浆在地壳底部大规模底侵,导致下地壳加厚,并形成角闪榴辉岩质新生下地壳。新生下地壳部分熔融,产生含矿埃达克质岩浆(Hou et al.,2004)。中新世,整个青藏高原处于后碰撞伸展环境中,横切造山带的正断层系统、平行造山带的逆冲断层系统控制了含矿岩浆的时空分布(侯增谦等,2007;Hou et al.,2009)。

2.8 中南半岛斑岩铜矿区

中南半岛属于环太平洋成矿域和特提斯成矿域的交汇部位,斑岩铜矿床数量储量都异常丰富,但大都是与现代洋壳俯冲有关的(Hutchison et al.,1978);与特提斯成矿域相关的目前报道有缅甸蒙育瓦 Monywa 铜矿(Jankovic,2001)、马来西亚 Mengpur 铜矿床和印度尼西亚苏门答腊岛上的 Tangse 矿床(Van Leeuwen et al.,1987,1994)。

2.9 土耳其 Anatolides 铜矿区

Anatolides 造山带位于土耳其中部,大地构造上夹持于欧亚大陆、阿拉伯板块和非洲板块之间。复杂的演化过程在 Anatolides 造山带内部各个地质单元中有明显记录。二叠纪古特提斯板块俯冲回撤(rollback)使得 Anatolides 从亚欧大陆上裂离,成为漂浮块体。晚三叠世卡宁期—早诺利期,古特提斯洋盆闭合,Anatolides 和 Taurus 地块拼合在一起(Moix et al.,2008)。侏罗纪—白垩纪周围洋盆的俯冲在 Anatolides 陆块上生成了多期次的岩浆活动。白垩纪末—古新世初,北侧 Vardar 洋盆的闭合在 Anatolides 陆块上生成有 I 型花岗闪长斑岩、花岗岩、二长岩(Nigel et al.,1994)。中新世开始,受阿拉伯板块与欧亚大陆南北向碰撞的影响,Anatolides 陆块地壳增厚,高原隆升,同时向西部爱琴海逃逸(Gursoy et al.,2008),后碰撞相关的钙碱性和碱性火山岩星点状散布于整个造山带(Sengor et al.,2008),岩性主要有安山岩、英安岩、粗面岩等(Yilmaz,2003a,2003b);火山岩年龄从北部的 11Ma 向南逐渐变为 17 世纪(Sengor et al.,2008)。

Anatolides 造山带内的斑岩矿床数量不多,星点状散布、成矿时代变化较大,无法划分出带。多为含 Mo 高的斑岩金矿。典型矿床有 Kisladag(Sillitoe,2002)、Copler 等(Yigit,2006)。

3 斑岩铜矿在东特提斯成矿域中的时间分布

斑岩铜矿主要产于活动大陆边缘的岛弧、陆缘弧环境(Kerrick et al.,2000;Cooke et al.,2005;Groves et al.,2007)以及碰撞造山带走滑、伸展地段(侯增谦等,2006a,2006c,2006d)。特提斯演化过程中,冈瓦纳大陆不断向欧亚大陆俯冲消减最终碰撞结合,这为斑岩铜矿的形成提供了极好的构造背景。随特提斯演化,斑岩铜矿床的形成集中在早三叠世、晚三叠世、白垩纪中期、白垩纪末—古新世初、中始新世、中中新世等 6 个主要时段(图 5)。

虽然特提斯演化始于泥盆纪,但与东特提斯成矿域有关的消减作用出现在晚二叠世,为中缅甸马苏地块向印度支那板块俯冲形成 Sukhothai 岛弧岩浆系统(Ueno et al.,2001;Sone et al.,2008),该区目前未见铜矿床报道。纵观世界范围内,斑岩铜矿床也较少出现在中生代以前,其浅成侵位的特点注定在太早的地块中不易保存(Blundell,2002;Groves et al.,2007)。东特提斯成矿域中首先形成斑岩铜矿床的时代见于早三叠世,代表矿床为马来西亚地区的 Mengpur 斑岩铜金矿床(Singer et al.,2005)。

晚三叠世古特提斯洋盆的闭合伴随着大规模俯冲消减,甘孜理塘洋盆西向俯冲形成了义敦岛弧带(Mo et al.,1994;侯增谦,2004b),其南部中甸压性弧中赋存有普朗、雪鸡坪等大型斑岩铜矿床,构成中甸铜矿带(曾普胜等,2003,2004)。

晚侏罗世—早白垩世古特提斯洋盆最终闭合,白垩纪中期班公湖—怒江的闭合在多不杂地区形成多不杂火山岩岩浆弧,该岩浆弧产有班公湖铜金矿带(曲晓明等,2006a)。

白垩纪末—古新世初,新特提斯洋盆的消减生成了一系列火山岩岩浆岛弧,其中土耳其地区 Pontides 造山带的钙碱性火山岩岩浆岛弧系中含多处大型斑岩铜矿床,称 Pontides 斑岩铜矿带。

中始新世,印度与欧亚大陆的碰撞进入晚碰撞阶段,为适应碰撞造成的物质调整,藏东缘形成了大型走滑断层。这些断层控制了含矿岩浆系统的就位,在走滑断层及其控制的拉分盆地附近形成了玉龙铜矿带(侯增谦等,2006a)。

中中新世为斑岩铜矿形成的高峰期,伊朗中部 Sahand-Bazman 铜矿带、巴基斯坦 Chagai 铜矿带、冈底斯铜矿带、缅甸蒙育瓦 Monywa 铜矿都于此时形成。冈底斯铜矿带是在后碰撞阶段伸展环境下岩

浆就位成矿,Sahand-Bazman 铜矿带和 Chagai 铜矿带是围绕伊朗—阿富汗地块形成的高钾增生岩浆带。

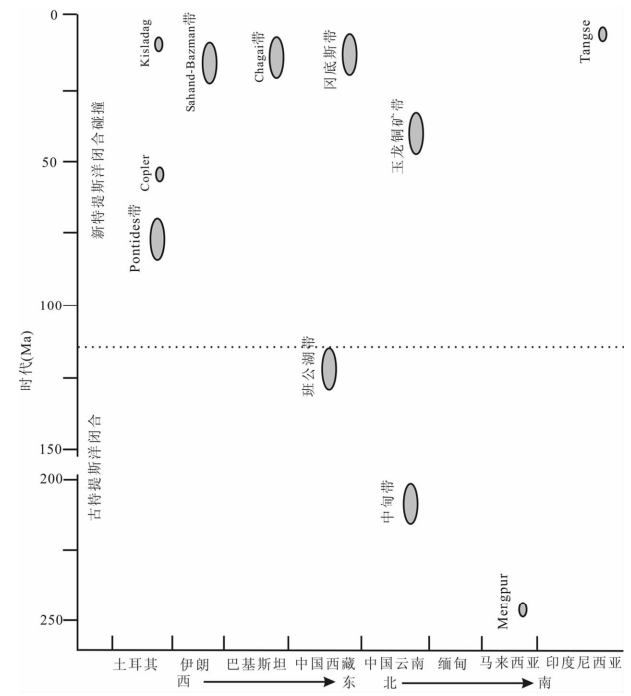


图 5 东特提斯成矿域中斑岩铜矿床的年代格架

Fig. 5 Geochronological framework of porphyry copper deposits in the eastern Tethyan metallogenic domain

4 讨论

从特提斯演化过程可以看出,特提斯所涵盖的范围包括空间的广阔性和时间的漫长性,而成矿过程本身也具有复杂性,这些因素影响了我们对特提斯成矿域的准确理解,斑岩铜矿床也不例外,因此涉及到的成矿中的问题较多。本文选取 Sahand-Bazman 铜矿带的构造背景进行讨论。

尽管伊朗中部 Sahand-Bazman 铜矿带的斑岩铜矿床世界知名,但其矿床成因和构造背景还不是很清楚(Cooke et al., 2005)。大体来讲,一种认为是亚平宁造山期伊朗中部地块活动陆缘俯冲形成的安第斯型岩浆弧(Shahabpour, 2007);另一种认为是造山带坍塌引起的后碰撞岩浆活动(Zarasvandi et al., 2005)。这两种观点在构造演化过程中相差甚远,可见只是从该带岩石信息上已经不能解决这个问题,应该放到更大尺度上,结合阿拉伯与欧亚大陆的碰撞过程来认识其成因。

有关特提斯的重大问题中,印度板块、阿拉伯板块与欧亚大陆的碰撞造山一直是热点,到现在碰撞

时限都不能达成一致认识,更不用说碰撞造山的具体过程。印度与欧亚大陆的碰撞时限争论很多,最早 70Ma(Yin et al., 2000; Yin, 2006),最晚也是 34Ma(Aitchison et al., 2007),而冈底斯斑岩铜矿带时代为 13.8~16.0Ma(侯增谦等, 2003; Hou et al., 2008),因此属于后碰撞的产物应该没有问题。阿拉伯板块与欧亚大陆的碰撞时限也是众说纷纭,观点之多,令人应接不暇,有晚白垩世、始新世、始新世—渐新世、渐新世、渐新世—中新世、早中新世、中新世、中晚中新世、晚中新世、上新世等不同认识(Guest et al., 2006)。

近几年来,来自构造和沉积方面的资料将最小时限界定为渐新世末—中新世初(23Ma),具体资料有:沉积岩石方面的约束将最小时限定为 16~23Ma(Robertson, 2000);板块重建方面认为不会晚于 10Ma(McQuarrie et al., 2003);Zagros 北部地区主要构造单元间彼此交切关系,得出至少是 25~23Ma(Agard et al., 2005);Zagros 冲断带中前陆盆地的变形时代界定与碰撞相关的缩短是在晚渐新世—早中新世(Fakhari et al., 2008; Ramsey et al., 2008);Zagros 造山带大量锆石年龄峰值将时限卡定为 45~28Ma(Horton et al., 2008)。综合来看这个时段更能客观反映碰撞过程,该时段与晚碰撞转换成矿及玉龙斑岩铜矿带形成时限相当。

基于这一认识,参考青藏高原地区的碰撞过程(侯增谦等, 2006a, 2006b, 2006c, 2006d),本文将特提斯西亚地区新生代演化概括为:古新世—始新世为新特提斯洋俯冲阶段,在 Anatolides 陆块上生成有 I 型花岗闪长斑岩、花岗岩、二长岩(Nigel et al., 1994),在 Pontides 造山带形成一套岛弧相关的钙碱性火山岩浆体系(Moix et al., 2008);始新世—渐新世末阿拉伯板块与伊朗中部地块开始碰撞,这次碰撞是一个多阶段的、累积的过程,造成了至少两个小洋盆的闭合(如 Glennie, 2000),在此阶段有大规模岩体侵位;早中新世—中中新世为晚碰撞阶段,伊朗地块和 Anatolides 地块地壳缩短,形成 Zagros 逆冲推覆系统(Golonka, 2004; Ramsey et al., 2008),块体隆升,同时走滑系统发育,Anatolides 向西逃逸(Gursoy et al., 2008),Sahand-Bazman 含矿斑岩侵位;晚中新世进入后碰撞阶段,大量钙碱性、碱性小岩株遍布全区(Sengor et al., 2008)。

上述的碰撞过程中三个阶段分别对应 Sahand-Bazman 地区的三期岩浆活动,值得提及的是,斜向碰撞的构造背景下形成的平行 Sahand-Bazman 造

山带的大型右行走滑事件的活动和演化对区域上构造岩浆矿化事件有明显控制作用(Sokoutis et al. , 2000; Zarasvandi et al. , 2005, 2007), 在 Darreh-Zerreshk 矿区表现最为明显。这一特征与青藏高原晚碰撞阶段的玉龙斑岩铜矿带相类似。

5 结 论

本文在详细资料收集的基础上, 以特提斯构造演化与成矿为主线, 将东特提斯成矿域中的斑岩铜矿床做了系统总结, 取得的主要认识有:

(1)空间上东特提斯成矿域中的斑岩铜矿床可划分为土耳其 Pontides、伊朗中部 Sahand-Bazman、巴基斯坦 Chagai、中国玉龙、中甸、班公湖、冈底斯等 7 条带, 另外中南半岛地区、土耳其 Anatolides 地区还存在若干斑岩铜矿点。

(2)时间上东特提斯成矿域中的斑岩铜矿床的形成主要集中在早三叠世、晚三叠世、白垩纪中期、白垩纪末—古新世初、中始新世、中中新世等 6 个段; 分别受古、新特提斯洋盆俯冲、俯冲后的碰撞等不同构造环境控制。

(3)通过伊朗中部 Sahand-Bazman 铜矿带构造背景的探讨, 认为阿拉伯与欧亚大陆碰撞过程与青藏高原碰撞过程相类似, 都经历了主碰撞阶段的挤压、晚碰撞阶段的走滑及后碰撞阶段的伸展等 3 期构造过程, 而 Sahand-Bazman 铜矿带的形成背景与玉龙成矿带可对比。

致谢: 本文资料收集过程中得到了西澳大学吕勇军博士的支持和帮助, 南京大学华仁民教授、中国科学院地质与地球物理所秦克章研究员、中国地质科学院矿产资源研究所张绮玲研究员、中国地质科学院地质研究所杨天南研究员审阅文章并提出了宝贵意见, 在此一并致谢。

参 考 文 献

从柏林, 吴根耀, 张旗, 张儒媛, 翟明国, 赵大升, 张雯华. 1993. 中国滇西古特提斯构造带岩石大地构造演化. 中国科学 B 辑, 23(11): 1201~1207.

范玉华, 李文昌. 2006. 云南普朗斑岩铜矿床地质特征. 中国地质, 33(2): 352~362.

郭利果, 刘玉平, 徐伟, 张兴春, 秦克章, 李铁胜, 石玉若. 2006. SHRIMP 锆石年代学对西藏玉龙斑岩铜矿成矿年龄的制约. 岩石学报, 22(4): 1009~1016.

侯增谦, 曲晓明, 黄卫, 高永丰. 2001. 冈底斯斑岩铜矿成矿带有望成为西藏第二条“玉龙”铜矿带. 中国地质, 28(10): 27~29.

侯增谦, 曲晓明, 王淑贤, 高永丰, 杜安道, 黄卫. 2003. 青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. 中国科学 D 辑, 33(7): 609~618.

侯增谦, 高永丰, 孟祥金, 曲晓明, 黄卫. 2004a. 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. 岩石学报, 20(2): 239~248.

侯增谦, 杨岳清, 曲晓明, 黄典豪, 吕庆田, 王海平, 余金杰, 唐绍华. 2004b. 三江地区义敦岛弧造山带演化和成矿系统. 地质学报, 78(1): 109~120.

侯增谦, 钟大赉, 邓万明. 2004c. 青藏高原东缘斑岩铜钼金成矿带的构造模式. 中国地质, 31(1): 1~14.

侯增谦, 孟祥金, 曲晓明, 高永丰. 2005. 西藏冈底斯斑岩铜矿带埃达克质斑岩含矿性: 源岩相变及深部过程约束. 矿床地质, 24(2): 108~121.

侯增谦, 莫宣学, 杨志明, 王安建, 潘桂棠, 曲晓明, 聂凤军. 2006a. 青藏高原碰撞造山带成矿作用: 构造背景、时空分布和主要类型. 中国地质, 33(2): 340~351.

侯增谦, 杨竹森, 徐文艺, 莫宣学, 丁林, 高永丰, 董方浏, 李光明, 曲晓明, 赵志丹, 江思宏, 孟祥金, 李振清, 秦克章, 杨志明. 2006b. 青藏高原碰撞造山带: I. 主碰撞造山成矿作用. 矿床地质, 25(4): 337~358.

侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 莫宣学, 田世洪, 孙晓明, 丁林, 王二七, 高永丰, 谢玉玲, 曾普胜, 秦克章, 许继峰, 曲晓明, 杨志明, 杨竹森, 费红彩, 孟祥金, 李振清. 2006c. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换成矿作用. 矿床地质, 25(5): 521~543.

侯增谦, 曲晓明, 杨竹森, 孟祥金, 李振清, 杨志明, 郑绵平, 郑有业, 聂凤军, 高永丰, 江思宏, 李光明. 2006d. 青藏高原碰撞造山带: III. 后碰撞伸展成矿作用. 矿床地质, 25(6): 629~651.

侯增谦, 潘小菲, 杨志明, 曲晓明. 2007. 初论大陆环境斑岩铜矿. 现代地质, 21(2): 332~351.

冷成彪, 张兴春, 王守旭, 秦朝建, 苟体忠, 王外全. 2008. 滇西北中甸松诺含矿斑岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义. 大地构造与成矿学, 32(1): 124~130.

李才, 黄小鹏, 翟庆国, 朱同兴, 于远山, 王根厚, 曾庆高. 2006. 龙木错-双湖-吉塘板块缝合带与青藏高原冈瓦纳北界. 地学前缘, 13(4): 136~147.

李才. 1987. 龙木错-双湖-澜沧江板块缝合带与石炭二叠纪冈瓦纳北界. 长春地质学院学报, 17(2): 155~166.

李光明, 李金祥, 秦克章, 张天平, 肖波. 2007. 西藏班公湖带多不杂超大型富金斑岩铜矿的高温高盐度高氧化成矿流体: 流体包裹体证据. 岩石学报, 23(5): 935~952.

林清茶, 夏斌, 张玉泉. 2006. 云南中甸地区雪鸡坪同碰撞石英闪长玢岩 SHRIMP U-Pb 定年及其意义. 地质通报, 25(1~2): 133~135.

莫宣学, 赵志丹, 邓晋福. 2003. 印度-亚洲大陆主碰撞过程与火山作用响应. 地学前缘, 10(3): 135~148.

潘桂棠. 1994. 全球洋-陆转换中的特提斯演化. 沉积与特提斯地质, 18: 23~40.

潘桂棠, 陈智梁, 李兴振等. 1997. 东特提斯地质构造形成演化. 北京: 地质出版社. 218 页.

潘桂棠, 王立全, 李兴振, 王洁民, 徐强. 2001. 青藏高原区域构造格局及其多岛弧盆系的空间配置. 沉积与特提斯地质, 21(3): 1~26.

- 潘桂棠, 王立全, 尹福光, 朱弟成, 耿全如, 廖忠礼. 2004. 从多岛弧盆系研究实践看板块构造登陆的魅力. 地质通报, 23(9~10): 933~939.
- 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 朱弟成, 王立全, 李光明, 赵志丹, 耿全如, 廖忠礼. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化. 岩石学报, 22(3): 521~533.
- 曲晓明, 侯增谦, 黄卫. 2001. 冈底斯斑岩铜矿(化)带: 西藏第二条“玉龙”铜矿带?. 矿床地质, 20(4): 355~366.
- 曲晓明, 辛洪波. 2006a. 藏西班牙湖斑岩铜矿带的形成时代与成矿构造环境. 地质通报, 25(7): 792~799.
- 曲晓明, 侯增谦, 莫宣学, 董国臣, 徐文艺, 辛洪波. 2006b. 冈底斯斑岩铜矿与南部青藏高原隆升之关系——来自含矿斑岩中多阶段锆石的证据. 矿床地质, 25(4): 388~400.
- 芮宗瑶, 李光明, 张立生, 王龙生, 王高明, 刘波. 2006. 青藏高原的金属矿产. 中国地质, 33(2): 363~373.
- 余宏全, 李进文, 丰成友, 马东方, 潘桂棠, 李光明. 2006. 西藏多不杂斑岩铜矿床高温高盐度流体包裹体及其成因意义. 地质学报, 80(9): 1434~1447.
- 施俊法, 李友枝, 金庆花, 唐金荣, 姚华军等. 2006. 世界矿情(亚洲卷). 北京: 地质出版社. 514 页.
- 曾普胜, 莫宣学, 喻学惠, 侯增谦, 徐启东, 王海平, 李红, 杨朝志. 2003. 滇西北中甸斑岩及斑岩铜矿. 矿床地质, 22(4): 393~400.
- 曾普胜, 侯增谦, 李丽辉, 屈文俊, 王海平, 李文昌, 蒙义峰, 杨竹森. 2004. 滇西北普朗斑岩铜矿床成矿时代及其意义. 地质通报, 23(11): 1127~1131.
- 曾普胜, 李文昌, 王海平, 李红. 2006a. 云南普朗印支期超大型斑岩铜矿床岩石学及年代学特征. 岩石学报, 22(4): 989~1000.
- 曾普胜, 侯增谦, 高永峰, 杜安道. 2006b. 印度—亚洲碰撞带东段喜马拉雅期铜-钼-金矿床 Re-Os 年龄及成矿作用. 地质论评, 52(1): 72~84.
- 周宜吉. 1980. 玉龙矿带中斑岩铜矿的控矿因素及其成因探讨. 地质论评, 26(4): 357~361.
- Agard P, Omrani J, Jolivet L, Mouthereau F. 2005. Convergence history across Zagros (Iran): constraints from collisional and earlier deformation. International Journal of Earth Sciences, 94: 401~419.
- Ahmad M U. 1992. Porphyry copper in Pakistan. Geological Survey of Pakistan. 21.
- Ahmad M, Rafiq M, Iqbal N, Akram W, Tasneem M A, Ali M. 2005. Investigation of Major Geothermal Fields of Pakistan Using Isotope and Chemical Techniques. Proceedings World Geothermal Congress. Antalya, Turkey. 1~10.
- Aitchison J C, Ali J R, Davis A M. 2007. When and where did India and Asia collide?. Journal of Geophysical Research, 112, B05432, doi:10.1029/2006JB004706.
- Alavi M. 1994. Tectonics of the Zagros Orogenic Belt of Iran; New Data and Interpretations. Tectonophysics, 229(3~4): 211~238.
- Alavi M. 1996. Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz mountain system in northern Iran. Journal of Geodynamics, 21(1): 1~33.
- Atapour H, Aftabi A. 2007. The geochemistry of gossans associated with Sarcheshmeh porphyry copper deposit, Rafsanjan, Kerman, Iran: Implications for exploration and the environment. Journal of Geochemical Exploration, 93(1): 47~65.
- Bagheri S, Stampfli G M. 2008. The Anarak, Jandaq and Posht-e-Badam metamorphic complexes in central Iran: New geological data, relationships and tectonic implications. Tectonophysics, 451(1~4): 123~155.
- Barr S M, Macdonald A S, Ounchanum P, Hamilton M A. 2006. Age, tectonic setting and regional implications of the Chiang Khong volcanic suite, northern Thailand. Journal of the Geological Society, 163(6): 1037~1046.
- Berberian F, Muir I D, Pankhurst R J, Berberian M. 1982. Late Cretaceous and early Miocene Andean type plutonic activity in northern Makran and central Iran. Journal of Geological Society of London, 139: 605~614.
- Blundell D J. 2002. The timing and location of major ore deposits in an evolving orogen: the geodynamic context. Geological Society, London, Special Publications, 204(1): 1~12.
- Bortolotti V, Principi G. 2005. Tethyan ophiolites and Pangea break-up. Island Arc, 14(4): 442~470.
- Breitzman L L, Birnie R W, Johnson G D. 1983. Fission-track ages of the Chagai intrusives, Baluchistan, Pakistan. Geological Society of America Bulletin, 94: 253~258.
- Brunet M F, Korotaev M V, Ershov A V, Nikishin A M. 2003. The South Caspian Basin: a review of its evolution from subsidence modelling. Sedimentary Geology, 156(1~4): 119~148.
- Calagari A A. 2003. Stable isotope (S, O, H and C) studies of the phyllic and potassic-phyllic alteration zones of the porphyry copper deposit at Sungun, East Azarbaijan, Iran. Journal of Asian Earth Sciences, 21(7): 767~780.
- Calagari A A. 2004a. Fluid inclusion studies in quartz veinlets in the porphyry copper deposit at Sungun, East-Azarbaijan, Iran. Journal of Asian Earth Sciences, 23(2): 179~189.
- Calagari A A. 2004b. Geology and fracture-related hypogene hydrothermal alteration and mineralization of porphyry copper deposit at Sungun, Iran. Journal of the Geological Society of India, 64(5): 595~618.
- Cooke D R, Hollings P, Walshe J L. 2005. Giant Porphyry Deposits: Characteristics, Distribution, and Tectonic Controls. Economic Geology, 100: 801~818.
- Dercourt J, Ricou L E, Vrielynck B. 1993. Atlas Tethys Paleoenvironmental Maps. Paris: Gauthier-Villars.
- Dixon C J, Pereira J. 1974. Plate Tectonics and Mineralization in the Tethyan Region. Mineralium Deposita 9: 185~198.
- Fakhari M D, Axen G J, Horton B K, Hassanzadeh J, Amini A. 2008. Revised age of proximal deposits in the Zagros foreland basin and implications for Cenozoic evolution of the High Zagros. Tectonophysics, 451(1~4): 170~185.
- Glennie K W. 2000. Cretaceous tectonic evolution of Arabia's

- eastern plate margin; A tale of two oceans. Society for Sedimentary Geology Special Publication, 69: 9~20.
- Golonka J, Bocharova N Y. 2000. Hot spot activity and the break-up of Pangea. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 161(1~2): 49~69.
- Golonka J. 2004. Plate tectonic evolution of the southern margin of Eurasia in the Mesozoic and Cenozoic. *Tectonophysics*, 381(1~4): 235~273.
- Groves D I, Bierlein F P. 2007. Geodynamic settings of mineral deposit systems. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 19~30.
- Gu X X, Tang J X, Wang C S, Chen J P, He B B. 2003. Himalayan magmatism and porphyry copper-molybdenum mineralization in the Yulong ore belt, East Tibet. *Mineralogy and Petrology*, 78(1~2): 1~20.
- Guest B, Guest A, Axen G. 2007. Late Tertiary tectonic evolution of northern Iran; A case for simple crustal folding. *Global and Planetary Change*, 58: 435~453.
- Guest B, Stockli D F, Grove M, Axen G J, Lam P S, Hassanzadeh J. 2006. Thermal histories from the central Alborz Mountains, northern Iran; Implications for the spatial and temporal distribution of deformation in northern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 118(11/12): 1507~1521.
- Gursoy H, Tatar O, Piper J D A, Heimann A, Kocbulut F, Mesci B L. 2008. Palaeomagnetic Study of Tertiary Volcanic domains in Southern Turkey and Neogene anticlockwise rotation of the Arabian Plate. *Tectonophysics*. DOI:10.1016/j.tecto.2008.11.001.
- Hassanzadeh J, Stockli D F, Horton B K, Axen G J, Stockli L D, Grove M, Schmitt A K, Walker J D. 2008. U-Pb zircon geochronology of late Neoproterozoic-Early Cambrian granitoids in Iran; Implications for paleogeography, magmatism, and exhumation history of Iranian basement. *Tectonophysics*, 451(1~4): 71~96.
- Hedenquist J W, Arribas A, Reynolds T J. 1998. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system; Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines. *Economic Geology*, 93(4): 373~404.
- Herzarkhani A, Williams-Jones A E, Gammons C H. 1999. Factors controlling copper solubility and chalcopyrite deposition in the Sungun porphyry copper deposit, Iran. *Mineralium Deposita*, 34(8): 770~783.
- Hezarkhani A, Williams-Jones A E. 1998. Controls of alteration and mineralization in the Sungun porphyry copper deposit, Iran; evidence from fluid inclusions and stable isotopes. *Economic Geology*, 93: 651~670.
- Hezarkhani A. 2006a. Hydrothermal evolution of the Sar-Cheshmeh porphyry Cu-Mo deposit, Iran; Evidence from fluid inclusions. *Journal of Asian Earth Sciences* 28: 409~422.
- Hezarkhani A. 2006b. Petrology of the intrusive rocks within the Sungun Porphyry Copper Deposit, Azerbaijan, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(3): 326~340.
- Horton B K, Hassanzadeh J, Stockli D F, Axen G J, Gillis R J, Guest B, Amini A, Fakhari M D, Zamanzadeh S M, Grove M. 2008. Detrital zircon provenance of Neoproterozoic to Cenozoic deposits in Iran; Implications for chronostratigraphy and collisional tectonics. *Tectonophysics*, 451(1~4): 97~122.
- Hou Z Q, Gao Y F, Qu X M, Rui Z Y, Mo X X. 2004. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in southern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 220(1~2): 139~155.
- Hou Z Q, Ma H W, Zaw K, Zhang Y Q, Wang M J, Wang Z, Pan G T, Tang R L. 2003. The Himalayan Yulong porphyry copper belt; Product of large-scale strike-slip faulting in eastern Tibet. *Economic Geology*, 98(1): 125~145.
- Hou Z Q, Zaw K, Pan G T, Mo X X, Xu Q, Hu Y Z, Li X Z. 2007. Sanjiang Tethyan metallogenesis in SW China; Tectonic setting, metallogenic epochs and deposit types. *Ore Geology Reviews*, 31(1~4): 48~87.
- Hou Z Q. 1993. The tectono-magmatic evolution of Yidun island-arc and geodynamic setting of the formation of Kuroko-type massive sulphide deposits in Sanjiang region, southwestern China. *Resource Geology*, 17: 336~350.
- Hou Z, Yang Z, Qu X, Meng X, Li Z, Beaudoin G, Rui Z, Gao Y. 2009. The Miocene Gangdese Porphyry Copper Belt generated during post-collisional extension in the Tibetan Orogen. *Ore Geology Reviews*, 36: 25~51.
- Hou Z, Zeng P, Gao Y, Du A, Fu D. 2006. Himalayan Cu Mo Au mineralization in the eastern Indo Asian collision zone; constraints from Re-Os dating of molybdenite. *Mineralium Deposita*, 41(1): 33~45.
- Hutchison C S, Taylor D. 1978. Metallogenesis in SE Asia. *Journal of the Geological Society*, 135(4): 407~428.
- Jankovic S, Petrascheck W E. 1987. Tectonics and metallogeny of the Alpine-Himalayan belt in the Mediterranean area and western Asia. *Episodes*, 10(3): 169~175.
- Jankovic S. 1977. The copper deposits and geotectonic setting of the Tethyan Eurasian Metallogenic Belt. *Mineralium Deposita*, 12(1): 37~47.
- Jankovic S. 1984. Metallogeny of the Alpine granitoids in the Tethyan Eurasian metallogenic belt. *Proceedings of the 27th International Geological Congress*. Utrecht. VNU Science press. p. 247~274.
- Jankovic S. 1997. The Carpatho-Balkanides and adjacent area; a sector of the Tethyan Eurasian metallogenic belt. *Mineralium Deposita*, 32: 426~433.
- Jankovic S. 2001. Tectonic setting and metallogenesis of the principal sectors of the Tethyan Eurasian metallogenic belt. *Geotectonica et Metallogenia*, 25(1~2): 14~36.
- Jian P, Liu D Y, Sun X M. 2008. SHRIMP dating of the Permo-Carboniferous Jinshajiang ophiolite, southwestern China; Geochronological constraints for the evolution of Paleo-Tethys. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(5~6): 371~384.
- Kerrick R, Goldfarb R, Groves D, Garwin S. 2000. The

- geodynamics of world-class gold deposits: Characteristics, space-time distributions, and origins. *Reviews in Economic Geology*, 13: 501~551.
- Liang H Y, Campbell I H, Allen C, Sun W D, Liu C Q, Yu H X, Xie Y W, Zhang Y Q. 2006. Zircon Ce^{4+}/Ce^{3+} ratios and ages for Yulong ore-bearing porphyries in eastern Tibet. *Mineralium Deposita*, 41(2): 152~159.
- Lowell J D, Guilbert J M. 1970. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 65(4): 373~408.
- McQuarrie N, Stock J M, Verdel C, Wernicke B P. 2003. Cenozoic evolution of Neotethys and implications for the causes of plate motions. *Geophysical Research Letters*, 30(20): 2036.
- Metcalfe I. 1994. Gondwanaland Origin, Dispersion, and Accretion of East and Southeast-Asian Continental Terranes. *Journal of South American Earth Sciences*, 7(3~4): 333~347.
- Metcalfe I. 1996. Gondwanaland dispersion, Asian accretion and evolution of eastern Tethys. *Australian Journal of Earth Sciences*, 43(6): 605~623.
- Metcalfe I. 1997. The Palaeo-Tethys and Palaeozoic-Mesozoic tectonic evolution of Southeast Asia. in: Dheeradiok P, Hinthong C, Chaodumrong P, Putthapiban P, Tansathien W, Utha-aroon C, Sattarak N, Nuchanong T and Techawan S, eds. *Stratigraphy and Tectonic Evolution of Southeast Asia and the South Pacific*. Bangkok, Thailand. p. 19~24.
- Metcalfe I. 1998. Palaeozoic and Mesozoic geological evolution of the SE Asian region: multidisciplinary constraints and implications for biogeography. in: Hall R and Holloway J D, eds. *Biogeography and Geological Evolution of SE Asia*. Amsterdam: Backbuys. 25~41.
- Metcalfe I. 2000. The Bentong-Raub Suture Zone. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(6): 691~712.
- Metcalfe I. 2002. Permian tectonic framework and palaeogeography of SE Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20(6): 551~566.
- Mo X, Deng J, Lu F. 1994. Volcanism and the evolution of Tethys in Sanjiang area, southwestern China. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 9(4): 325~333.
- Moix P, Beccaleto L, Kozur H W, Hochard C, Rosselet F, Stampfli G M. 2008. A new classification of the Turkish terranes and sutures and its implication for the paleotectonic history of the region. *Tectonophysics*, 451(1~4): 7~39.
- Moore W J, McKre E H, ArrNer O. 1986. Chemistry and chronology of plutonic rocks in the Pontide mountains, northern Turkey. in: Jankovrc S and Sillitoe R H, eds. *European Copper Deposits*. Belgrade: Faculty of Geology and Mining, Belgrade University, Yugoslavia. 209~215.
- Mutschler F E, Ludington S, Bookstrom A A. 1999. Giant porphyry-related metal camps of the world—A database. U. S. Geological Survey Open-File Report 99-0566, <http://geopubs.wr.usgs.gov/open-file/of99-556>.
- Nakov R, Kerestedjian T, Kunov A. 2002. The Silistar Intrusive, Eastern Srednogie Zone, Bulgaria: Structural Data and Potential for Porphyry Copper and Epithermal Systems. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 11: 217~229.
- Nigel B W, Kelly S, Okay A I. 1994. Postcollision magmatism and tectonics in northwest Anatolia. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 117: 241~252.
- Ohta E, Dogan R, Batic H, Abe M. 1988. Geology and mineralization of Derekoy porphyry copper deposit, northern Thrace, Turkey. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 39(2): 115~134.
- Perello J, Raziq A, Schloderer J, Asadur R. 2008. The Chagai Porphyry Copper Belt, Baluchistan Province, Pakistan. *Economic Geology*, 103, 1583~1612.
- Peng Z, Watanabe M, Hoshino K, Sueoka S, Yano T, Nishido H. 1998. The Machangqing copper-molybdenum deposits, Yunnan, China - an example of Himalayan porphyry-hosted Cu-Mo mineralization. *Mineralogy and Petrology*, 63(1): 95~117.
- Pivnik D A, Wells N A. 1996. The transition from Tethys to the Himalaya as recorded in northwest Pakistan. *Geological Society of America Bulletin*, 108(10): 1295~1313.
- Qu X, Hou Z, Li Y. 2004. Melt components derived from a subducted slab in late orogenic ore-bearing porphyries in the Gangdese copper belt, southern Tibetan plateau. *Lithos*, 74: 131~148.
- Ramsey L A, Walker R T, Jackson J. 2008. Fold evolution and drainage development in the Zagros mountains of Fars province, SE Iran. *Basin Research*, 20(1): 23~48.
- Reid A, Wilson C J L, Shun L, Pearson N, Belousova E. 2007. Mesozoic plutons of the Yidun Arc, SW China: U/Pb geochronology and Hf isotopic signature. *Ore Geology Reviews*, 31(1~4): 88~106.
- Richards J P, Kerrich R. 2007. Special Paper: Adakite-Like Rocks: Their Diverse Origins and Questionable Role in Metallogenesis. *Economic Geology*, 102(4): 537~576.
- Richards J P. 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation. *Economic Geology*, 98: 1515~1533.
- Robertson A H F. 2000. Mesozoic-Tertiary Tectonic-Sedimentary Evolution of a South Tethyan Oceanic Basin and its Margins in Southern Turkey. *Geological Society, London, Special Publications*, 173(1): 97~138.
- Robertson A H F. 2002. Overview of the genesis and emplacement of Mesozoic ophiolites in the Eastern Mediterranean Tethyan region. *Lithos*, 65(1~2): 1~67.
- Samani B. 1998. Distribution, setting and metallogenesis of copper deposits in Iran. in: Porter T M, ed. *Porphyry and hydrothermal copper and gold deposits: A Global Perspective*. Perth. Glenside, South Australia, Australian Mineral Foundation. 135~158.
- Searle M P. 1996. Cooling history, exhumation and kinematics of the Himalaya-Karakorum-Tibet orogenic belt. in: Yin A and Harrison T M, eds. *The Tectonic Evolution of Asia*;

- Cambridge Univ. Press, Cambridge. 110~137.
- Sengor A M C, Natalin B A. 1996. Palaeotectonics of Asia; fragments of a synthesis. in: Yin A and Harrison M, eds. *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge University Press. 443~486.
- Sengor A M C, Cin A, Rowley D B, Shangyou N. 1991. Magmatic evolution of the Tethysides; a guide to reconstruction of collage history. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 87(1~4): 411~440.
- Sengor A M C, Ozeren M S, Keskin M, Sakinc M, Ozbakir A D, Kayan I. 2008. Eastern Turkish high plateau as a small Turkic-type orogen; Implications for post-collisional crust-forming processes in Turkic-type orogens. *Earth-Science Reviews*, 90: 1~48.
- Sengor A M C. 1979. Mid-Mezozoic closure of Permo-Triassic Tethys and its implications. *Nature*, 279: 590~593.
- Sengor A M C. 1987. Tectonics of the Tethysides: Orogenic Collage Development in a Collisional Setting. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 15: 213~244.
- Sengor A M C. 1991. Plate tectonics and orogenic research after 25 years: Synopsis of a Tethyan perspective. *Tectonophysics*, 187(1~3): 315~330, 337~344.
- Sepehr M, Cosgrove J W. 2004. Structural framework of the Zagros Fold-Thrust Belt, Iran. *Marine and Petroleum Geology*, 21(7): 829~843.
- Shahabpour J. 2005. Tectonic evolution of the orogenic belt in the region located between Kerman and Neyriz. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 405~417.
- Shahabpour J. 2007. Island-arc affinity of the Central Iranian Volcanic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30: 652~665.
- Shi R D, Yang J S, Xu Z Q, Qi X X. 2008. The Bangong Lake ophiolite (NW Tibet) and its bearing on the tectonic evolution of the Bangong-Nujiang suture zone. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(5~6): 438~457.
- Sillitoe R H, Khan S N. 1977. Geology of Saindak porphyry copper deposit, Pakistan. *Institution of Mining and Metallurgy Transaction Section B*. B27~B42.
- Sillitoe R H. 1972. A Plate Tectonic Model for the Origin of Porphyry Copper Deposits. *Economic Geology*, 67(2): 184~197.
- Sillitoe R H. 1973. Geology of the Los Pelambres Porphyry Copper Deposit, Chile. *Economic Geology*, 68(1): 1~10.
- Sillitoe R H. 1978. Metallogenic evolution of a collisional mountain belt in Pakistan: a preliminary analysis. *Journal of the Geological Society*, 135: 377~387.
- Sillitoe R H. 1979. Some thoughts on gold-rich porphyry copper deposits. *Mineralium Deposita*, 14: 161~174.
- Sillitoe R H. 2002. Some metallogenic features of gold and copper deposits related to alkaline rocks and consequences for exploration. *Mineralium Deposita*, 37: 4~13.
- Singer D A, Berger V I, Moring B C. 2005. Porphyry copper deposits of the world; database, map, and grade and tonnage models. U. S. Geological Survey Open-File Report 2005-1060. [available on the World Wide Web at <http://pubs.usgs.gov/of/2005/1060/>].
- Sokoutis D, Bonini M, Medvedev S, Boccaletti M, Talbot C J, Koyi H. 2000. Indentation of a continent with a built-in thickness change: experiment and nature. *Tectonophysics*, 320: 243~270.
- Sone M, Metcalfe I. 2008. Parallel Tethyan sutures in mainland Southeast Asia: New insights for Palaeo-Tethys closure and implications for the Indosinian orogeny. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(2~3): 166~179.
- Sorkhabi R, Heydari E. 2008. Asia out of Tethys: Foreword-Preface. *Tectonophysics*, 451(1~4): 1~6.
- Spakman W. 1986. Subduction beneath Eurasia in connection with the Mesozoic Tethys. *Geologie en Mijnbouw*, 65: 145~153.
- Stampfli G M, Borel G D. 2002. A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons. *Earth and Planetary Science Letters*, 196(1~2): 17~33.
- Stampfli G M. 2000. Tethyan oceans. *Geological Society, London, Special Publications*, 173: 1~23.
- Stocklin J. 1974. Possible ancient continental margins in Iran. in: Burke C and Drake C, eds. *Geology of continental margins*. New York: Springer-Verlag. 873~877.
- Strashimirov S, Petrunov R, Karaziski M. 2002. Porphyry copper mineralization in the Central Srednogie zone, Bulgaria. *Mineralium Deposita*, 37: 587~598.
- Titley S R, Beane R E. 1981. Porphyry copper deposit: Part I. Geologic settings, petrology, and tectonogenesis. *Economic Geology 75th Anniversary Volume*: 214~234.
- Ueno K, Hisada K-i. 2001. The Nan-Uttaradit-Sa Kao Suture as a Main Paleo-Tethyan Suture in Thailand; Is it Real?. *Gondwana Research*, 4(4): 804~806.
- Ueno K. 2003. The Permian fusulinoidean faunas of the Sibumasu and Baoshan blocks; their implications for the paleogeographic and paleoclimatologic reconstruction of the Cimmerian Continent. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 193(1): 1~24.
- Van Leeuwen T M. 1994. 25 years of mineral exploration and discovery in Indonesia. *Journal of Geochemical Exploration*, 50: 13~90.
- Van Leeuwen T, Taylor R, Hutagalung J. 1987. The geology of the Tangse porphyry copper-molybdenum prospect, Aceh, Indonesia. *Economic Geology*, 82: 27~42.
- Vassileef L, Vassileva G S. 1988. Porphyry copper systems as markers of the Mesozoic-Cenozoic active margin of Eurasia. *Tectonophysics*, 154: 167~169.
- Veevers J J. 2004. Gondwanaland from 650~500 Ma assembly through 320 Ma merger in Pangea to 185~100 Ma breakup: supercontinental tectonics via stratigraphy and radiometric dating. *Earth-Science Reviews*, 68: 1~132.
- Wang D, Li W Q L Z, Yin H, Chen Y. 2005. Mineralization

Episode of porphyry copper deposits in the Jinshajiang-Red River mineralization belt: Re-Os dating. *Science in China (Ser. D Earth Sciences)*, 48(2): 192~198.

Wang X F, Metcalfe I, Jian P, He L Q, Wang C S. 2000. The Jinshajiang-Ailaoshan Suture Zone, China: tectonostratigraphy, age and evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(6): 675~690.

Waterman G C, Hamilton R L. 1975. The Sar Cheshmeh porphyry copper deposit. *Economic Geology*, 70: 568~576.

Yavuz F, Iskenderoglu A, Jiang S. 1999. Tourmaline compositions from the Salikvan porphyry Cu-Mo deposit and vicinity, Northeastern Turkey. *The Canadian Mineralogist*, 37: 1007~1023.

Yigit O. 2006. Gold in Turkey—a missing link in Tethyan metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 28(2): 147~179.

Yilmaz H. 2003a. Exploration at the Kusçayiri Au (Cu) prospect and its implications for porphyry-related mineralization in western Turkey. *Journal of Geochemical Exploration*, 77(2~3): 133~150.

Yilmaz H. 2003b. Geochemical exploration for gold in western Turkey: success and failure. *Journal of Geochemical Exploration*, 80: 117~135.

Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211~280.

Yin A. 2006. Cenozoic tectonic evolution of the Himalayan orogen as constrained by along-strike variation of structural geometry, exhumation history, and foreland sedimentation. *Earth-Science Reviews*, 76(1~2): 1~131.

Zanchi A, Berra F, Mattei M, Ghassemi M R, Sabouri J. 2006. Inversion tectonics in central Alborz, Iran. *Journal of Structural Geology*, 28: 2023~2037.

Zarasvandi A, Liaghat S, Zentilli M. 2005. Geology of the Darreh-Zerreshk and Ali-Abad porphyry copper deposits, Central Iran. *International Geology Review*, 47(6): 620~646.

Zarasvandi A, Liaghat S, Zentilli M, Reynolds P H. 2007. ⁴⁰Ar/³⁹Ar Geochronology of alteration and petrogenesis of porphyry copper-related granitoids in the Darreh-Zerreshk and Ali-Abad area, Central Iran. *Exploration and Mining Geology*, 16(1~2): 11~24.

The Temporal and Spatial Distribution of Porphyry Copper Deposits in the Eastern Tethyan Metallogenic Domain: A Review

ZHANG Hongrui¹⁾, HOU Zengqian¹⁾, SONG Yucai¹⁾, LI Zheng¹⁾, YANG Zhiming¹⁾,
WANG Zhaolin¹⁾, WANG Xiaohu¹⁾, WANG Shuxian²⁾

1) Institute of Geology, CAGS, Beijing, 100037; 2) National Research Center of Geoanalysis, Beijing, 100037

Abstract

The porphyry copper deposits in the Tethyan metallogenic domain (TMD) are much more poorly documented in contrasting to those in the circum-Pacific area, from which a classical metallogenic model of porphyry copper deposits was synthesized. Here we try to classify spatially the porphyry copper deposits in the eastern TMD into seven belts basing on previously published data. Besides, two areas were suggested where those deposits without obvious tectonic setting were enclosed. These belts are: Pontides in Turkey, Sahand-Bazman in Central Iran, Chagai in Pakistan, Yulong, Zhongdian, Bangonghu, and Gangdese in China, respectively; and the two areas are SE Asia and Anatolides in Turkey respectively. According to published geochronological data, the porphyry copper deposits can be merged into six main metallogenic epochs: the Early Triassic, Late Triassic, middle Cretaceous, Late Cretaceous-Early Paleocene, middle Eocene, and middle Miocene, which were related with the subduction of the Paleo-, and Neo-Tethyan Oceans and subsequent collisions respectively. Of these belts, the Sahand-Bazman and the Yulong belts were quite comparable; both formed in the same late-collisional transformation settings.

Key words: porphyry copper deposits; metallogenic model; temporal and spatial distribution; the eastern Tethyan metallogenic domain