

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

侯增谦¹ 莫宣学² 杨志明¹ 王安建³ 潘桂棠⁴ 曲晓明⁵ 聂凤军⁵

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学, 北京 100083;
3. 中国地质科学院, 北京 100037; 4. 中国地质调查局成都地质矿产研究所, ; 四川 成都 610082;
5. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要:大陆成矿作用是当代区域成矿学研究的重大前沿, 增进对大陆碰撞造山带成矿作用的理解和认识是孕育和建立大陆成矿理论框架的核心和关键。长期以来, 由于对系统完整地记录大陆碰撞过程的典型造山带的成矿作用缺乏深入系统的研究, 对碰撞造山过程及壳/幔相互作用与成矿作用的耦合关系和成因联系缺乏深刻的理解, 导致了对碰撞成矿阶段以及各阶段动力学过程认识不清, 引发了较多争议。青藏高原造山带, 成矿规模大、形成时代新、矿床类型多、保存条件好, 为系统地研究大陆成矿作用、解决上述存在的问题提供了天然实验室。“印度—亚洲主碰撞带成矿作用”973 项目组通过对青藏高原碰撞造山带成矿作用历时 3 年的系统研究, 建立了青藏高原重要成矿事件的时空坐标, 初步建立了成矿作用的地球动力学模型或构造控制模型, 提出了一套完整的大陆碰撞带成矿理论新框架, 包括三大成矿作用和 12 种矿床类型: 同碰撞造山成矿作用(65~41 Ma, 4 种矿床类型), 晚碰撞转换成矿作用(40~26Ma, 4 种矿床类型), 后碰撞伸展成矿作用(25~0 Ma, 4 种矿床类型)。其主控因素分别为: 碰撞造山背景、壳源岩浆活动和大规模剪切变形; 陆内转换背景、幔源岩浆活动和大规模走滑-推覆-剪切作用; 后碰撞伸展环境、壳/幔岩浆作用和热液对流系统。

关键词:造山带; 成矿作用; 矿床类型; 时空分布; 主控因素; 青藏高原

中图分类号: P618.4~5, P542+.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2006)02-0340-12

与板块构造“难以登陆”类似, 基于板块构造而建立的成矿理论在解释大陆成矿方面也遇到了一系列重大难题, 迫使人们开始思考和研究大陆成矿作用问题。在大陆构造及其形成演化中, 最重要的和最典型的大陆动力学过程莫过于陆-陆碰撞造山作用, 而目前人们对陆-陆碰撞成矿作用还知之不多。这种客观现实驱使成矿学研究的重心向大陆碰撞成矿理论研究转变。

不容置疑, 前人对陆-陆碰撞形成的古代碰撞造山带及其成矿作用的研究, 大大地增进了人们对大陆碰撞与成矿问题的理解。如 Sawkins^[1]和 Seltmann 等^[2]通过对欧洲大陆碰撞造山带成矿作用研究, 初步提出了碰撞造山矿床分类, 并识别出 6 种主要矿床类型; 陈衍景等^[3~4]通过对中国秦岭碰撞造山带成矿作用的系统研究, 初步提出了碰撞造山成岩成矿模式。然而, 由于这些碰撞造山带形成时代较早, 详细的陆陆碰撞过程难以重塑再造, 同时又由于矿床类型相对单调, 且后

期破坏改造强烈, 因此, 对成矿作用的认识和理解仍存有一定的多解性和局限性。

青藏高原是印度板块与亚洲板块自 65 Ma 以来强烈碰撞而形成的活动大陆碰撞造山带, 伴随印—亚大陆碰撞造山而发生的成矿作用, 以成矿规模大(大型—巨型矿床)、成矿时代新(65 Ma~现代)、矿床类型多(成因独特)、保存条件好(后期改造轻微)为特征, 是研究大陆碰撞带成矿作用的天然实验室。此外, 对于这个至今仍在活动的大陆碰撞造山带及其晚近成矿作用, 便于使用新构造研究方法直接论证各种地质关系, 易于恢复再造碰撞作用详细过程, 从而可为区域成矿提供清楚明确的地质构造背景; 使用现代观测—探测技术直接探测岩石圈的深部结构, 易于查明成矿系统所根植的上部地壳构造变形和控矿要素, 从而可为理解成矿作用过程提供相对明确的深部过程信息; 便于使用“岩石探针”技术和同位素示踪技术揭示壳/幔物质交换过程, 易于追踪成矿物质的

收稿日期: 2006-03-14; 改回日期: 2006-03-20

基金项目: 国家重点基础研究发展规划“973”项目(2002CB412600)资助。

作者简介: 侯增谦, 男, 1961 年生, 博士, 研究员, 主要从事大陆成矿作用研究和海底热水成矿作用; E-mail: houzengqian@126.com。

分散—集聚过程,从而可为了解成矿动力学过程提供重要的地球化学约束;便于使用各种适时现场观测手段直接观察现代成矿作用,易于深入了解和定量研究成矿作用机制,从而可建立古今大陆碰撞带成矿理论模式提供坚实的对比参照^⑤。因此青藏高原具有研究碰撞与成矿的独特地域优势。为深刻揭示大陆碰撞造山带的成矿作用,科技部批准并启动了“印度—亚洲主碰撞带成矿作用”973项目(2002—2007)。经过3年多研究,取得了重要进展。

笔者基于前人和本项目所获得的大量资料和研究成果基础上,初步提出印—亚大陆碰撞造山经历主碰撞、晚碰撞和后碰撞过程,每一碰撞过程均发生独具特色的成矿作用,形成标示性的矿床类型(图1)。在此基础上,本文阐述了3个碰撞造山—成矿作用的动力学背景、成矿主导因素和构造控制模式。

1 印度—亚洲大陆碰撞过程:主碰撞、晚碰撞与后碰撞

正确划分和厘定碰撞造山的发育阶段和演化过程,是认识和理解碰撞造山带成矿作用的前提和基础。对于造山或碰撞造山过程和环境常有不同的划分方案和表述名称:如从造山时期角度,有造山(orogenic)、后造山(post-orogenic)和非造山(anorogenic)之分;从构造环境角度,又有活动边缘(active margin)、碰撞环境(collision或syn-collision)、后碰撞(post-collision)或晚碰撞(late-collision)环境以及板内环境(intraplate)之分。活动边缘源于大洋板片的俯冲,碰撞环境因两个大陆的汇聚拼贴。总体上,碰撞和后碰撞环境出现于造山期,而板内环境出现于后造山期和非造山期。

就碰撞造山过程而言,亦有“三分”与“两分”之别。“三分”观点将碰撞造山过程分为同碰撞、晚碰撞和后碰撞,将两个大陆板块强烈汇聚—碰撞期称为(同)碰撞期,之后进入晚碰撞期,整个碰撞造山过程的结束以后碰撞期发育为标志。“两分”观点认为,从晚碰撞向后碰撞的转换,既不清楚,又难以界定,故建议将碰撞造山过程两分为(同)碰撞和后碰撞^⑥。后碰撞期开始于主要洋盆闭合之后但仍存在沿巨型剪切带发生陆块水平运动的陆内环境,并由此区别于陆块构成统一整体的板内环境。从后碰撞向板内环境的转变,标志着整个造山期的结束^⑦。

图2展示了印度—亚洲大陆碰撞以来青藏高原主要的构造—岩浆事件及其时空坐标。整个高原火山—岩浆事件显示出清楚的三段性。

第一时段时代为65~41 Ma,对应于印度—亚洲大陆的同碰撞或主碰撞期,主要产物是厚达5000余米的林子宗火山岩系和延伸长达1500余千米的冈底斯花岗岩基,两者均产于主碰撞带内,前者主要为钙碱性—高K钙碱性—钾玄岩系列岩石组合,区域性不整合地覆盖于白垩纪地层之上,其⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄为64~41 Ma^[7-8];后者主要以闪长岩—二长闪长岩—花岗闪长岩—花岗岩组合为特征,沿整个冈底斯 Andes 型

岩浆弧发育,向东延伸至滇西腾梁地区(图1),其侵位高峰在70~45 Ma^[9-10]。这个时段的火山—岩浆作用与区域沉积记录,作为印度与亚洲大陆的重要产物,共同记录着两个大陆自65 Ma前后开始碰撞,并持续至41 Ma^[8,11]。

与碰撞岩浆作用相伴的区域地壳变形,主要发生在以冈底斯为主体的EW向展布的主碰撞变形带,形成了东西长达数千千米高海拔的喜马拉雅和广阔的青藏高原。在藏南,以主边界逆冲断裂(MBT)、主中央逆冲断裂(MCT)和藏南拆离系(STDS)为边界的低喜马拉雅、高喜马拉雅和北喜马拉雅构造岩片,作为隶属印度大陆的喜马拉雅被动大陆边缘组成部分,发生强烈褶皱和逆冲,形成一系列北倾的叠瓦状逆冲断裂带,其强烈逆冲和近130 km的地壳缩短发生在50~17 Ma间^[12]。在藏南,其南缘的雅鲁藏布江缝合带(IYS)分别被南倾的大反向逆冲断裂系(GCT)和北倾的冈底斯逆冲断裂系(GC)所改造,并导致上盘冈底斯弧花岗岩基大面积剥露,其内部发育旁多—错勤逆冲系^[13],调节了拉萨地体的地壳缩短。在藏北,以金沙江缝合带(JS)为标志的古特提斯洋板块于晚古生代完成了向羌塘地体的俯冲过程^[14],于碰撞期转变为大规模逆冲或走滑断裂带^[15]。

第二时段时代为40~26 Ma,除冈底斯南带断续发育少量高铝花岗岩外,岩浆活动主要集中于羌塘地体和青藏高原东缘。火山—岩浆岩以钾质岩为主体,钠质岩系次之,碳酸岩—碱性杂岩也有发育,岩浆活动高峰集中于(35±2) Ma^[16-17]。在羌塘地体,强烈的火山活动形成大面积、小体积分布的火山岩系,被解释为大陆碰撞背景下的陆内俯冲产物^[18-19];在青藏高原东缘,沿大规模走滑断裂带,形成著名的金沙江—红河富碱侵入岩带和勉冕宁—德昌碳酸岩—碱性杂岩带,也被认为与陆内俯冲过程有关^[15]。

伴随晚碰撞岩浆活动的地壳变形,主要发生在青藏高原东缘的构造转换带,以发育一系列新生代走滑断裂系和褶皱逆冲断裂系为特征(图1),通常被解释为吸收印—亚大陆碰撞引起的应力应变的碰撞调节带^[20]。对应的变形大体分2个阶段:古新世—始新世(65~40 Ma)压扭阶段和渐新世—中新世压扭/张扭转换阶段(40~17 Ma)。早期的压扭作用在北段形成风火山—囊谦褶皱逆冲断裂系,被42~45 Ma的侵入岩贯入,并导致地壳总缩短量为60~80 km^[21]。在中南段导致走滑断裂的走向滑动变形,兰坪盆地产生了强烈的逆冲推覆,形成兰坪—思茅褶皱带,并使地壳缩短达50~60 km^[22]。早期压扭/张扭转换作用形成一系列走滑断裂系,自北部的风火山—囊谦逆冲带,经中部的贡觉—芒康断裂,向南沿红河断裂带延伸,控制不连续的钾质火成岩省的发育。晚期压扭/张扭转换作用还形成了著名的红河大型剪切带,早期为左行走滑,晚期变为右行走滑^[23]。由同构造晚期花岗岩的U—Pb年龄推测,大规模左行走滑发育的时间为23~24 Ma^[24]。这些晚碰撞构造—岩浆事件表明,以陆内俯冲为主动力的晚碰撞造山作用起始于40 Ma,延续至26 Ma。将以陆块间的汇聚俯冲

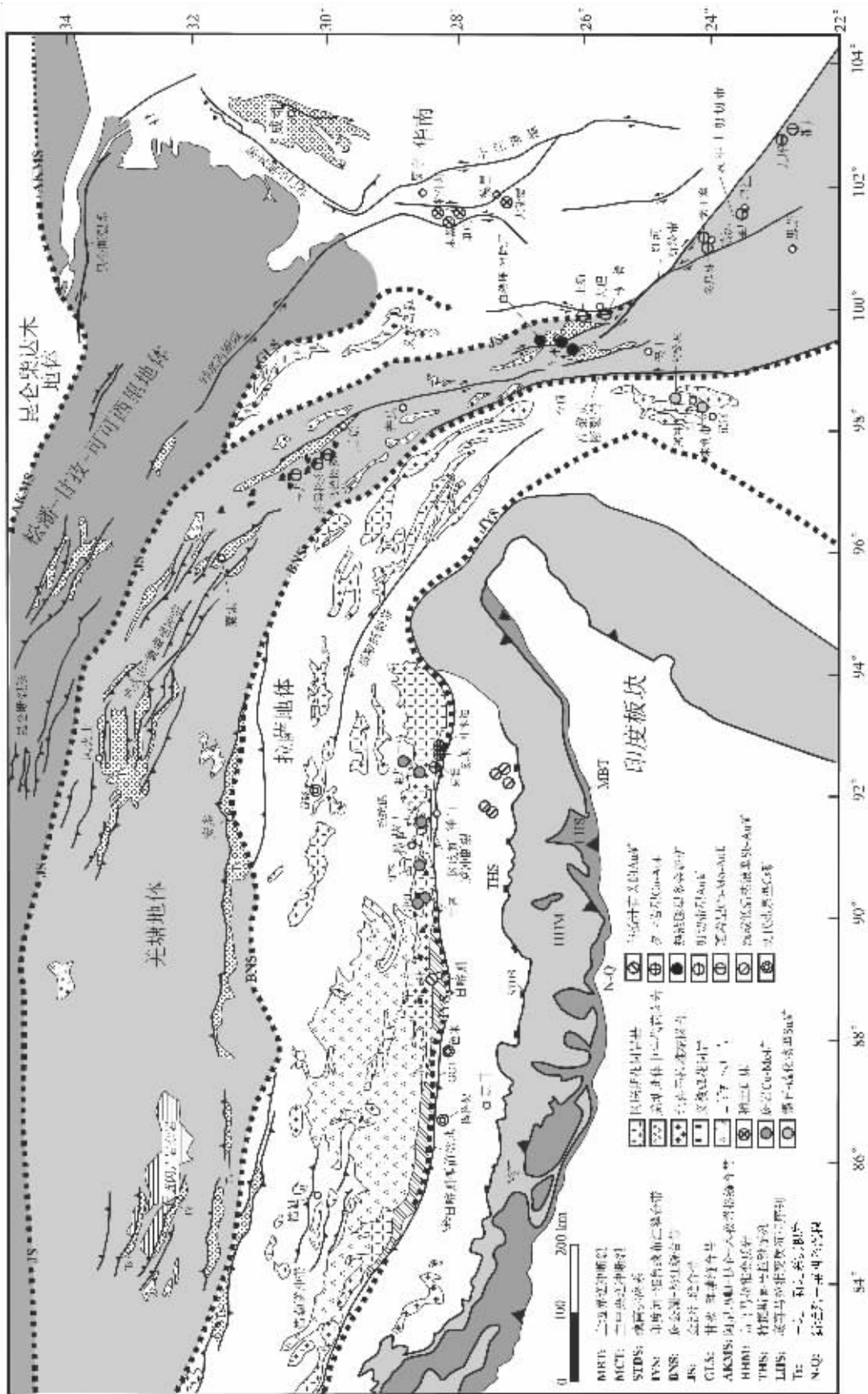


图 1 青藏高原碰撞山带的构造格架及矿床分布

Fig.1 Tectonic framework and spatial distribution of mineral deposits in the Himalayan-Qinghai-Tibet Plateau orogen

或陆内俯冲为主动力的时段称为晚碰撞期。

第三时段时代为 25~0 Ma, 对应于后碰撞伸展期。主要岩浆产物是高原腹地的钾质-超钾质岩浆岩、藏南的高铝-过铝花岗岩和高原东缘的基性火山岩系。在高原腹地, 钾质-超钾质火山岩大面积、小体积、遍布整个高原, 但主要沿近 NS 向正断层系统分布。火山活动时限较长 (25~0.3 Ma), 但集中于 13 Ma 以来^[9]; 钾质岩浆岩主要呈斑岩产出, 沿冈底斯分布, 构成含 Cu 斑岩带, 年龄集中于 18~12 Ma^[9]。在藏南, 岩浆活动主要形成高铝-过铝花岗岩, 产出于藏南拆离系南部, 年龄为 20~12 Ma (图 2), 部分花岗岩体侵入于藏南拆离系 (STDS) 内部的若干变质热穹隆 (变质核杂岩) 中心, 结晶年龄为 17~10 Ma^[9]。在高原东缘, 伴随着东西向伸展和南海盆地的大规模扩张, 沿走滑断裂系发育新生代线性分布的基性火山岩系, 在南海盆地则呈大面积产出^[15]。

与后碰撞伸展岩浆活动相伴的地壳变形在不同部位有不同变形方式, 但均以地壳伸展为特征。在高原腹地, 最显著的变形是形成一系列跨越不同构造单元的 NS 向正断层系统, 构成 NS 向裂谷的边界断裂, 并切割高原内部 EW 向展布的逆冲断裂系。NS 向正断层系统形成于 14 Ma 前^[9], EW 向伸展和裂谷的初始发育始于 18 Ma 左右^[9]。在藏南拆离系, 则发育一个 EW 向延伸的北倾低角度正断层系统^[9], 是

印度大陆板块向北俯冲过程的前缘滑脱拆离产物或其北侧的下地壳物质 (构造岩片) 向南挤出而后缘滑脱的产物 (王二七, 私人通讯), 并不同程度地被 NS 向正断层系统所切割。根据藏南拆离系上下盘出露的淡色花岗岩的结晶年龄推断, STDS 发育始于 21~7 Ma^[9], 持续至 8~9 Ma^[9], 大体上与地壳 EW 向伸展和正断层系统发育时限相当。在高原东缘, 始于中新世的 EW 向伸展, 使该区处于裂谷化状态, 局部扩张形成南海盆地。因此, 第三时段属典型的后碰撞期, 以地壳伸展、正断层系统和壳/幔岩浆活动为其标示性特征。

2 大陆碰撞造山带的成矿作用: 作用类型与 时空分布

青藏高原的成矿作用贯穿于印—亚大陆碰撞造山的全过程, 主要集中分布于 3 个重要的成矿构造单元: 以冈底斯为主体的主碰撞变形带、喜马拉雅带的藏南拆离系和调节大陆碰撞应变的东缘构造转换带^[9]。根据碰撞造山带重要成矿事件的时空坐标 (图 3) 以及碰撞造山过程及其岩石圈结构与深部过程对成矿作用的控制, 将大陆碰撞成矿作用概括为 3 个成矿作用, 即主碰撞造山成矿作用、晚碰撞转换成矿作用和后碰撞伸展成矿作用, 其中包括 12 种主要矿床类型。

主碰撞造山成矿作用发生于主碰撞期 (65~41 Ma), 形成于以地壳增厚、壳源岩浆活动、同碰撞剪切和逆冲推覆为特征的碰撞汇聚和挤压增生环境。成矿作用主要发育于主碰撞变形带, 与碰撞期花岗岩有关, 并受大规模逆冲-剪切带控制。主要形成与碰撞期花岗岩有关的云英岩型 Sn 矿、夕卡岩型 Cu-Au-Mo 矿、造山型 Au 矿和复合型 Au-Cu 矿。

晚碰撞转换成矿作用发生于晚碰撞期 (40~26 Ma), 形成于以壳/幔物质流动、幔源或壳/幔混源岩浆活动、大规模走滑断裂和大规模走滑剪切为特征的陆内俯冲和构造转换环境。成矿作用主要发育于藏东构造转换带, 与晚碰撞期钾质斑岩和岩浆碳酸岩-正长岩密切相关, 受大规模走滑断裂带、逆冲推覆构造与构造圈闭及大规模剪切带控制。主要形成斑岩型 Cu-Mo 矿、浅成低温热液型 Au 矿、热卤水型 Pb-Zn 和 Cu-Ag-Pb-Zn 矿和造山型 (剪切带型) Au 矿。

后碰撞伸展成矿作用发生于后碰撞伸展期 (25~0 Ma), 形成于以岩石圈地幔对流减薄、大规模拆离系统、大量 NS 向正断层及裂谷发育和幔源或壳/幔混源钾质-超钾质岩浆活动为特征的地壳伸展环境。成矿作用主要发育于主碰撞变形带和藏南拆离系, 与后碰撞期伸展构造、钾质斑岩和大规模流体对流循环密切相关。主要形成斑岩型 Cu 矿、浅成低温热液 Sb-Au 矿、现代热泉型 Cs-B-Li-Au 矿和热液脉型/夕卡岩型 Ag 多金属矿。

3 主碰撞造山成矿作用: 主控因素与矿床类型

主碰撞阶段是否能成矿, 一直存在着较大的争议。多数

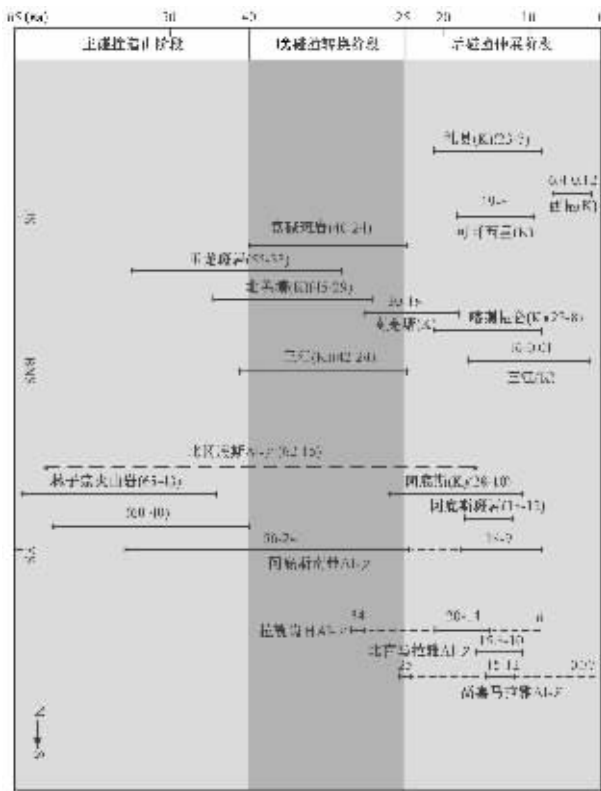


图 2 青藏高原碰撞造山带主要构造-岩浆事件的时空框架 (据莫宣学等, 未刊资料)

Fig. 2 Temporal-spatial framework of major tectonic-magma events in the Himalayan-Qinghai-Tibet Plateau orogen

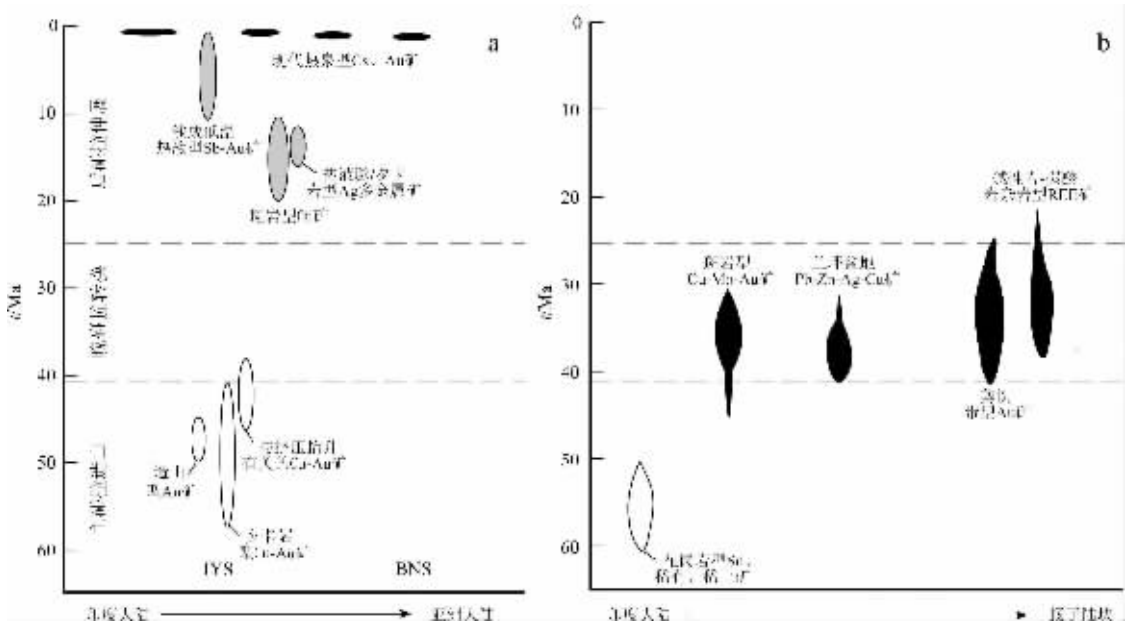


图3 青藏高原碰撞造山带主要成矿事件的年代格架

Fig.3 Geochronological framework of major mineralization events in the Himalayan-Qinghai-Tibet Plateau orogen

人认为大陆碰撞成矿作用主要发生在后碰撞伸展过程^[233-35]或挤压-伸展转换阶段^[3-4],但决不意味着主碰撞阶段不能发生成矿作用。实际上,青藏高原碰撞造山带主碰撞阶段虽表现为强烈挤压,但在主碰撞的中晚期阶段,碰撞造山带曾出现了短暂的应力松弛或NS向伸展(丁林,个人通讯)。故认为这个过程不仅可以成矿,而且可以形成大型-超大型矿床,关于主碰撞成矿作用的详细过程、矿床类型及动力学机制等,已另文阐述^[36],在此仅对主碰撞造山期的各种类型矿床作简要概述。

3.1 与碰撞期花岗岩有关的 Sn、W、Li、Rb、Y、Nb、Ta 矿床

沿冈底斯大规模侵位的花岗岩带是印-亚大陆强烈碰撞期的代表性产物之一,而与碰撞期花岗岩有关的 Sn、W、Li、Rb、Y、Nb、Ta 矿床则主要位于该花岗岩带的东延部分腾冲-梁河花岗岩区,该区因围绕东构造结的块体走滑与旋转而呈近 NS 向展布。岩石地球化学和 Sr-Nd 同位素特征表明,此类花岗岩浆起源于地壳的重融,源岩物质以沉积砂板质岩石为主^[37]。二长花岗岩和钾长花岗岩(65~52 Ma)具有富 Al 和过 Al 花岗岩特征,形成云英岩型 Sn 矿,叠加于海西期块状硫化物矿体之上,典型代表是滇西腾冲来利山大型 Sn 矿。白云母花岗岩和白云母钠长花岗岩(<65 Ma)属过 Al 到强过 Al 花岗岩,伴有强烈的稀有金属(Li, Rb, Cs, Nb, Ta, Zr, Hf)和稀土金属(Y, Ce, Sc)矿化,以云英型和热液脉型为主,产于白云母钠长花岗岩体及内外接触带,典型代表是滇西腾冲百花脑矿床。

3.2 与碰撞期花岗岩有关的夕卡岩型 Cu-Au 矿床

成矿作用主要发育于冈底斯花岗岩基南缘雅鲁藏布江沿岸,与成矿有关的花岗岩主要为早次侵入的花岗闪长岩和晚期就位的二长花岗岩,其 Ar-Ar 年龄分别为 57 Ma 和 47.6 Ma,是碰撞造山期的典型产物;岩石地球化学特征显示,此类岩浆起源于壳/幔混合作用。在花岗岩体与灰岩-碎屑岩系接触带,发育夕卡岩型 Cu-Au 矿化;该 Cu-Au 矿带西起克鲁、普下、温区,经劣布、双步结热,东至冲木达、陈坝,长达 50 余千米;代表性矿床包括冲木达、克鲁和朗达等矿床。有限的辉钼矿 Re-Os 测年资料显示,其成矿作用延续至 41.4 Ma(李光明等,未刊资料)。

3.3 造山带型 Au 矿床

众多研究表明,伴随着强烈的造山过程和变质作用,常常形成一系列受增生构造控制的石英脉型系列金矿,即造山型金矿^[38-40]。造山型金矿主要形成于外会聚超大陆旋回,或者内会聚超大陆聚合旋回的外缘地区。在青藏高原碰撞造山带,特别是在主碰撞变形带,此类矿床也大量发育。代表性矿床为西部阿里地区的马攸木金矿(之前称为热泉型金矿)。其形成发育与印度大陆板块偏向拉萨地体的会聚俯冲作用有关,成矿带受缝合带构造控制,产于改造 IYS 的逆冲断裂系统和大型剪切带及其派生的次级构造中,矿床严格地受控于脆性-韧性变形转变过程和转变空间。矿化类型主要包括网脉和脉群、剪切带中的薄板状脉体、蚀变破碎角砾岩和韧性剪切带。据初步测年资料,马攸木金矿热液云母及含矿石英

脉 Ar-Ar 年龄分别为 50 Ma(江思宏,未刊资料)、44 Ma^[41],表明成矿作用同步于或滞后于峰期变质作用和晚期构造作用,成矿流体可能来自俯冲洋壳板块的变质流体或陆壳沉积物中挤压流体。

3.4 与挤压抬升有关的 Cu-Au 成矿事件

此期成矿事件主要见于日喀则地区,沿雅鲁藏布江北岸的花岗岩带南侧发育(图 1)。此事件成矿强度很大,形成著名的雄村大型 Cu-Au 矿、洞嘎中型 Cu-Au 矿以及则莫多拉具有大型远景的 Cu-Au 矿床。这些矿床均受 NW 向断裂控制,区域上呈 NW 向斜列式排布。该成矿事件可能有较长的发育时限,初始矿化与岩浆热液系统有关,其年龄可以用钾长石-石英-电气石-白云母伟晶岩来限定。伟晶岩的钾长石 K-Ar 年龄为 47 Ma(杨竹森,未刊资料),估计起始成矿热液活动大致出现于 45 Ma。主期矿化与浅成低温热液系统有关,热液绢云母的 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄限定其主成矿期在 38 Ma 左右^[42]。与初始成矿事件有关的岩浆系统,因没有出露地表而难以确定其时代和性质,但根据伟晶岩的年龄资料推测,深部岩浆系统也可能是应力松弛阶段的壳/幔混源长英质岩浆。

4 晚碰撞转换成矿作用:主控因素与矿床类型

对于整个碰撞造山成矿过程而言,晚碰撞挤压-伸展转换期无疑是较为重要的成矿阶段,对此,许多学者作了大量的论述^[34, 35]。青藏高原晚碰撞转换成矿作用主要发生于 40~24 Ma,形成于以壳/幔物质流动、幔源或壳/幔混源岩浆活动、大规模走滑断裂和大规模走滑剪切为特征的陆内俯冲和构造转换环境。成矿作用主要发育于藏东构造转换带,与晚碰撞期钾质斑岩、钾质煌斑岩及岩浆碳酸岩-正长岩密切相关,受大规模走滑断裂带和剪切带控制(图 4)。

4.1 斑岩 Cu-Mo-Au 矿

该斑岩 Cu-Mo-Au 矿是青藏高原大陆碰撞造山最重要的矿床类型之一,以发育于晚碰撞陆内环境而不同于岛弧或陆缘弧环境的斑岩铜矿。成矿作用发生于晚碰撞期藏东构造转换带之压扭/张扭转换阶段,斑岩成矿带严格受大规模走滑断裂系统控制^[35]。代表性成矿带包括北段的玉龙铜矿带和南段的鹤庆-祥云斑岩 Cu-Mo-Au 矿带。玉龙铜矿带长约 200 km,宽 15~30 km,大约由 20 余个含矿斑岩体构成。斑岩铜矿带严格受贡觉-芒康走滑断裂带控制,与贡觉走滑拉分盆地共生(图 4)。含矿斑岩体主要呈陡直的岩管、岩瘤超浅成侵位产出(1.5~3 km),以多期次脉动侵位为特征,侵位高峰分别集中于 50 Ma、40 Ma 和 33 Ma^[35, 43~45]。辉钼矿 Re-Os 测年表明,成矿年龄集中于 40~36 Ma^[16, 46]。含矿斑岩以二长花岗岩为主,高钾质, LILE (K, Rb, Ba) 相对富集, HFSE (Zr, Hf, Nb, Ta)^[47] 相对亏损,显示似埃达克岩地球化学亲和性^[48]。Sr-Nd 同位素组成反映其岩浆来自有幔源物质注入的壳/幔过渡带^[49]。斑岩铜矿带矿化特征与岛弧环境的斑岩铜矿类似^[49],斑岩铜矿床显示典型的同心环状蚀变分带特征。

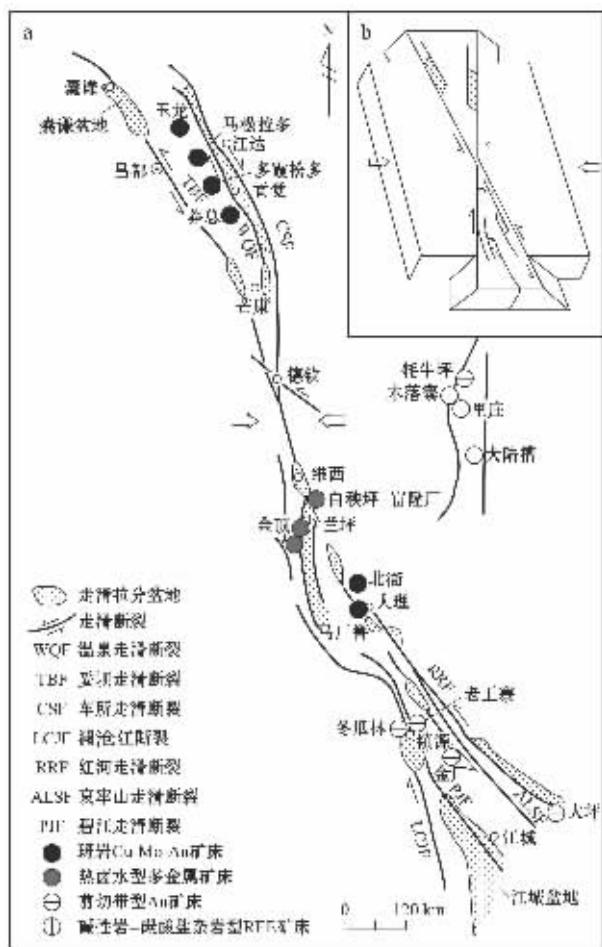


图 4 高原东缘构造转换带主要构造与成矿带分布示意图

Fig.4 Major tectonic and ore zone distribution in eastern Tibet

南带鹤庆-祥云斑岩铜矿的含矿斑岩体侵位时代与玉龙斑岩铜矿带相当,主要集中于 48~32 Ma^[50~51],成矿年龄也较为接近,为 36~32 Ma^[16],但岩性偏碱性,以石英正长斑岩为主,花岗斑岩次之。矿化组合以 Au-Cu 为主,伴生少量 Pb-Zn。含矿斑岩岩浆-热液系统早期形成斑岩铜-钼矿,与典型斑岩铜矿类似,代表性矿床是马厂箐铜-钼矿床^[52];晚期演化成浅成低温热液 Au 矿化系统,形成以热液脉型和热液角砾岩型 Au 矿体,典型代表首推北衙金矿。

4.2 逆冲推覆有关的热卤水多金属矿

成矿作用发育于高原东缘的构造转换带环境,以兰坪盆地银多金属矿带为典型代表。印度-亚洲大陆在 65 Ma 的碰撞事件,使得经历了印支期裂谷和燕山期拗陷的兰坪-思茅盆地在压扭背景下演变为走滑拉分盆地,并接受古新统云龙组含膏盐建造的泥质粉砂岩和含水透水的砂岩系沉积。伴随着大陆的强烈碰撞,在压扭应力下,兰坪盆地边缘抬升,并发育逆冲断裂系,两侧中生代地层沿逆冲断裂带发生强烈推

覆,形成构造圈闭。同时,碰撞压扭作用驱动盆地卤水汇聚。在金顶地区,构造圈闭导致了大规模盐穹发育和含油气卤水的大量聚集(王安建等,未刊资料)。随后的压扭/张扭转换,导致油气储库破裂,汇聚流体向构造圈闭排泄,导致膏盐的熔融,金属从卤水中大量堆积形成金顶超大型 Pb-Zn 矿床。在白秧坪地区,沿逆冲断裂带或层间滑脱带快速运移、排泄的卤水流体卸载,形成热液脉型 Ag 多金属矿床。

与其他碰撞造山带大量发育的密西西比(MVT)型矿床相比^[14],兰坪盆地的成矿作用机制总体类似,所不同的是,前者的赋矿建造为大面积分布的碳酸盐岩,后者的赋矿建造是多孔中粗粒砂岩与低渗透率碳泥质岩。

4.3 碱性岩-碳酸岩杂岩型 REE 矿

碱性岩-碳酸岩杂岩型 REE 矿是高原东缘最重要的矿床类型之一,以产于四川西部的冕宁 REE 矿带为主要代表。成矿作用发育于晚碰撞期藏东构造转换带之压扭/张扭转换阶段,与喜山期碱性正长岩-碳酸岩杂岩体的侵入有关,受调节碰撞变形的大规模走滑断裂系统控制^[17]。冕宁 REE 矿带北起冕宁牦牛坪,南至大陆乡,长约 150 km,宽约 10 km^[53],受印度-亚洲大陆碰撞期间复活的安宁河断裂、箐河-程海断裂控制,代表性矿床有牦牛坪、大陆槽、里庄等^[17]。与矿化有关的碱性岩-碳酸岩杂岩多呈岩株、岩枝、岩脉超浅成侵位产出(0.8~1.8 km)^[54],侵位高峰集中于 34 Ma^[17, 53]。矿石中钍铀 U-Pb 及黑云母 K-Ar 测年表明,成矿年龄集中于 23~40 Ma^[55]。本区碳酸岩岩石组合为碳酸盐-正长岩,两者成岩年代相近,空间上密切共生,REE 及 Sr、Nd、Pb 同位素组成相似,显示出由同源岩浆的发生不混融作用而形成的特征^[53]。该岩石明显富集不相容元素(Sr, Ba, REE),具有初始火成碳酸岩的 C、O 同位素组成;Sr-Nd-Pb 同位素组成反映其源区为介于 EM I 与 EM II 之间的一种混合地幔,这种地幔可能由不同比例混合的深海/陆源沉积物与元古代俯冲产生的似 MORB 洋壳再循环而形成^[17]。牦牛坪、大陆槽、里庄等矿床石英、萤石中的流体包裹体显微测温结果及对 C、H、O 同位素研究表明,成矿流体为富含 CO₂ 的地幔流体^[54-57]。

4.4 剪切带型 Au 矿

剪切带型 Au 矿是晚碰撞期构造转换带最重要的金矿类型。其不同于同碰撞期造山带型金矿,形成于大规模走滑剪切带和著名的哀牢山金矿带。该成矿带主体沿红河剪切带分布,产于 3 条断裂夹持的、右行斜列分布的蛇绿混杂岩构造岩片内(图 4)。构造上,哀牢山断裂和九甲-墨江断裂控制了哀牢山金矿带的展布,NW 向脆性剪切带与近 EW 向逆冲断裂带的交汇部位,控制了金矿田或金矿床的分布,不同岩性层脆韧性剪切带控制着单个矿床或矿体的形成^[58]。矿床主要属构造蚀变岩型或剪切带型^[59],但可分老王寨式、金厂式和库独木式,具有典型的造山型金矿特征^[9]。矿化强度与石炭纪基性-超基性岩及燕山-喜山期煌斑岩发育强度呈正相关关系,反映成矿作用与哀牢山洋壳物质(矿源)和晚期岩浆活

动(热源)密切相关^[59]。同位素结果研究表明,金主要源于被流体淋漓的蛇绿混杂岩,成矿流体以大气水为主,但有岩浆水或少量幔源流体贡献^[58, 60]。主成矿期为喜山期,年龄估计为 35~43 Ma^[59]。

5 后碰撞伸展成矿作用:主控因素与矿床类型

正如众多的研究者所强调的那样,后碰撞伸展阶段是碰撞造山过程中最为重要的成矿阶段^[2, 33-35]。在青藏高原,起始于 20~18 Ma 的东西向伸展作用^[29],作为岩石圈地幔减薄和软流圈上涌的直接结果,产生一系列地质事件,如近 NS 向正断层系统的发育^[27-28]、钾质斑岩浅成侵位^[26, 61]、热泉流体活动,导致了冈底斯斑岩 Cu 矿带、热液脉型/夕卡岩型 Ag 多金属矿带、浅成低温热液 Sb-Au 矿床以及现代热泉型 Cs-Au 矿床和与碱性侵入体有关的斑岩/浅成低温 Au 矿床的形成和发育。

5.1 斑岩型 Cu 矿

斑岩型 Cu 矿是后碰撞期的最重要的矿床类型,形成了著名的冈底斯斑岩铜矿带(图 1)。其以产出于后碰撞地壳伸展环境,区别于岛弧环境的环太平洋斑岩铜矿带和晚碰撞转换环境的玉龙斑岩铜矿。冈底斯斑岩铜矿带长约 350 km、宽 30~50 km,由 4 个大型矿床(驱龙、甲马、冲江、厅官)和 3 个中-小型矿床(白荣、南木、朱若)构成。含矿斑岩侵入体整体上东西成带,侵入于花岗岩基及少量灰岩、火山岩内;南北成串,明显受 NS 向正断层系统控制。含铜斑岩体结晶年龄为 20~12 Ma,其侵位高峰期在(16±1)Ma 左右^[62-64]。成矿年龄为 13.5~20.7 Ma,集中于(15±1)Ma 左右^[63, 65-66],证实斑岩岩浆-程控系统发育于冈底斯抬升(19~21 Ma)之后的后碰撞伸展环境。含矿斑岩体一般为浅成复式岩体,深度和直径均小于 2 km,主要岩相为二长花岗岩斑岩和石英二长花岗岩斑岩,岩石属钾玄质和/或高钾钙碱性系列^[67],区别于岛弧环境含矿斑岩,地球化学显示埃达克岩(adakite)亲合性^[26, 68]。其相对较宽的 $\epsilon_{Nd}(t)$ (+5.52~-6.18) 和相对较高的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i (0.605 0~0.607 5)反映岩浆起源于加厚的新生下地壳^[29]。俯冲的印度大陆板片断离(Break-off)引起的软流圈物质上涌为新生下地壳熔融提供热源机制。斑岩矿化特征类似于岛弧环境的斑岩铜矿,也显示以含矿斑岩为核心的环状蚀变分带,即钾硅酸盐带→石英-绢云母化→青磐岩化带,但主矿体主要集中于中心相钾硅酸盐带内。多数矿床缺乏强烈的次生富集带。流体包裹体和同位素研究表明,成矿流体来自高氧化态的长英质岩浆,富含金属的超临界岩浆流体晚期阶段有天水注入而稀释^[69-71]。

5.2 热液脉型/夕卡岩型 Ag 多金属矿

在冈底斯斑岩铜矿带北侧,发育一条与之平行的新的 Ag 多金属矿化带。该矿化带受旁多-措勤逆冲系控制,多数矿床和矿点分布于逆冲推覆构造带内,呈近 EW 向带状展布,更多地受前缘缓角度的逆冲断裂带控制。矿床多位于

EW向逆冲断裂与NS向张性构造的交汇部位。依矿化特点差异,可分为东西两段。以羊八井为界,东段以夕卡岩型Cu-Pb-Zn-Ag矿化为主,与斑岩型矿化显示某种成因联系,具有代表性的夕卡岩型矿床首推帮浦Cu-Pb-Zn矿床,Re-Os年龄为14~16 Ma,与斑岩铜矿的成矿时代相当^[6]。西段以热液脉型Ag-Pb-Zn矿化为主,与岩浆活动没有必然联系。银铅矿体赋存在流纹质角砾凝灰岩中的张性破碎带内,脉状矿体走向近NS,或呈近NS向延展,部分地段脉状矿体呈等间距产出,受NS向正断层控制。代表性矿床首推那如松多银铅矿床和夏龙银多金属矿,后者的热液母岩K-Ar年龄为25 Ma(孟祥金,未刊资料),与后碰撞伸展起始时间(~25 Ma)相当。控矿构造模式研究表明,EW向逆冲断裂具有输导流体的通道功能,碰撞后伸展形成的扩容空间,即NS向正断层或正断层与逆冲断裂交汇产生的扩容空间,为向上排泄的流体和金属提供了集聚和定位空间。

5.3 浅成低温热液型Sb-Au矿

成矿作用主要发育于IYS以南的藏南拆离-冲断带内。Sb-Au成矿作用主要与STDS及变质核杂岩和花岗岩侵入体密切相关,构成一条平行STDS长达百余千米的Sb-Au矿化带。与变质热穹隆及花岗岩侵入体有关的矿化以Au为主,具有以中央侵入体为中心的环状分布,内部以Au为主,向外过渡到Au-Sb组合,主要受变质核杂岩边缘的剥离断层控制,出现于变质核杂岩边部二云石英片岩中的糜棱岩和构造蚀变岩中;与STDS有关的Sb(-Au)矿化,呈EW向带状展布,与STDS及其北侧的冲断带有关。Sb(-Au)矿化体通常受一系列近南北向正断层(~14Ma)与东西向断裂带交汇部位控制,矿体总体呈近NS向延伸展布。对扎西康地区、措美哲古地区、马扎拉地区以及萨拉岗地区Sb(-Au)矿详细研究表明,矿床具有典型的热泉型矿化特征,铋金矿体类似于现代海底“黑烟囱”沉积成矿特征(侯增谦,未刊资料)。这些受古陆表热泉流体活动控制的铋金矿化的东西成带,成片和南北成群、成串的空间分布特征暗示,藏南拆离-冲断带有望成为世界级规模的铋矿带。

5.4 现代热泉型Cs、Au矿

现代热泉型Cs、Au矿是青藏高原碰撞造山带的特色矿床之一。其产出分别受后碰撞伸展期的高原腹地的正断层系统和高原东西两端构造结附近的大型走滑断裂系统控制。在高原腹地,14Ma以来大量发育的NS向正断层系统及其控制的地堑裂谷盆地,控制了区域性的热泉活动,地震亮点所揭示的壳内部分熔融层的发育,为区域热水流体对流循环提供了重要热源^[72-75]。热水流体与富B高Cs花岗岩质岩石的强烈水/岩反应,导致了区域热泉流体具有异常高的稀散稀碱金属的高度浓集。在西部塔格架、色米和东部古堆、谷露等地,热泉中Cs含量高达 58×10^{-6} ,远高于世界范围热泉Cs含量($2.8 \times 10^{-6} \sim 6.2 \times 10^{-6}$)。Cs呈凝胶形式,通过OCs⁻与OH⁻结合,赋存于蛋白石和玉燧矿物中,使Cs进一步富集成矿^[76]。据初

步评价,部分热田的堆积硅华的铯含量平均达0.15%~0.13%,其中,塔格架和布雄朗古Cs矿已达大型规模^[76]。此外,西藏高原大量盐湖高度富集Li、Cs、B等稀碱金属,达到大型规模。最近研究表明,这些稀碱金属的大量浓集可能与含热泉流体向盐湖的注入有关。

热泉型Au主要见于高原东缘腾冲热海地区,其产出环境显著不同于火山岛弧区,Au主要产于热流体沸腾爆炸形成的含黄铁矿液爆角砾岩中,其次赋存于化学沉积形成的硅华、硅质岩和硅质脉体以及热水活动通道附近的热水蚀变岩中。据初步评价,腾冲热泉金矿目前仅达小型规模。此外,在高原腹地西段拉昂错—王曲工布一带和东段当雄地区,古泉华体中也发现金矿化,其Au含量为0.3~1.0 g/t(多吉和郑绵平,未刊资料),预示着高原腹地也可能存在热泉型金矿。

参考文献(References):

- [1] Sawkins F J. Metal Deposits in Relation to Plate Tectonics[M]. Second edition, Berlin: Springer-Verlag, 1990. 1~461.
- [2] Seltmann R, Kampf H, Moller P. Metallogensis in collisional orogens[M]. Geo-Forschungs Zentrum Postdam, 1994. 1~434.
- [3] 陈衍景. 陆内碰撞造山体制的流体作用模式及成矿的关系——理论推导和东秦岭金矿床的研究结果[J]. 地学前缘, 1996, 3(3-4): 282~289.
Chen Yanjing. Fluidization model of intracontinental collision and its metallogenic significance: Theoretical inference and evidences from gold deposits, the eastern Qinling Mountains[J]. Earth Science Frontiers, 1996, 3(3-4): 282~289(in Chinese with English abstract).
- [4] 陈衍景, 陈华勇, 刘玉琳, 等. 碰撞造山过程内生矿床成矿作用的研究历史和进展[J]. 科学通报, 1999, 44(16): 1681~1689.
Chen Yanjing, Chen Huayong, Liu Yulin, et al. Research history and advance on endogenetic metallogeny in the continental collision [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(16): 1681~1689(in Chinese).
- [5] 侯增谦, 吕庆田, 王安建, 等. 初论陆-陆碰撞与成矿作用——以青藏高原造山带为例[J]. 矿床地质, 2003, 22(4): 319~333.
Hou Zengqian, Lü Qingtian, Wang Anjian, et al. Continental collision and related metallogeny: A case study of mineralization in Tibetan orogen[J]. Mineral Deposits, 2003, 22(4): 319~333(in Chinese with English abstract).
- [6] Liégeois J P. Some words on the post-collisional magmatism[J]. Lithos, 1998, 45: ix~xii.
- [7] 莫宣学, 赵志丹, 邓普福, 等. 印度亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J]. 地学前缘, 2003, 10 (3): 135~148.
Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Deng Jinfu, et al. Response of volcanism to the India-Asia collision [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10 (3): 135~148 (in Chinese with English abstract).
- [8] 周肃, 莫宣学, 董国臣, 等. 西藏林周盆地林子宗火山岩⁴⁰Ar/³⁹Ar年代格架[J]. 科学通报, 2004, 49(20): 2095~2103.
Zhou Su, Mo Xuanxue, Dong Guochen, et al., ⁴⁰Ar-³⁹Ar geochronology of Cenozoic Linzong volcanic rocks from Linzhou Basin, Tibet, China, and their geological implications[J]. Chinese

- Science Bulletin, 2004, 49(18):1970~1979.
- [9] Schärer E, Xu R H, Allègre 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.
- [10] Harrison T M, Grove M, McKeegan K D, et al. Origin and episodic emplacement of the manaslu intrusive complex, Central Himalaya[J]. Journal of Petrology, 1999, 40:3~19.
- [11] 王成善, 刘志飞, 李祥辉, 等. 西藏日喀则弧前盆地与雅鲁藏布江缝合带[M]. 北京:地质出版社, 1999.1~237.
Wang Chengshan, Liu Zhifei, Li Xianghui, et al. Xigaze Forearc Basin and Yarlung Zangbo Suture Zone, Tibet[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999. 1~237(in Chinese).
- [12] Ratschbacher L, Frisch W, Liu Guanghua, et al. Distributed deformation in southern and western Tibet during and after the India-Asia collision[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99:19, 917~19,946.
- [13] 叶培盛. 拉萨地块中部蛇绿岩与逆冲推覆构造[D]. 中国地质科学院地质力学研究所博士学位论文, 2004, 1~124.
Ye Peisheng. Ophiolites and thrust system of middle Lhasa block [D]. Unpub. Ph.D dissertation, 2004, 1~24 (in Chinese with English abstract).
- [14] 刘增乾, 李兴振, 叶庆同, 等. 三江地区构造岩浆带的划分与矿产分布规律[M]. 北京:地质出版社, 1993. 1~243.
Liu Zengqian, Li Xingzhen, Ye Qingtong, et al. Dividing of Tectono-magmatic Belts and Distribution of the Ore Deposits in Sanjiang Region[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1993. 1~243(in Chinese).
- [15] Wang Jianghai, Yin An, 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.
- [16] Hou Zengqian, Zeng Pusheng, Gao Yongfeng. The Himalayan Cu-Mo-Au mineralization in the eastern Indo-Asian collision zone: constraints from Re-Os dating of molybdenite[J]. Mineralium Deposita, 2006a, 39(in press).
- [17] Hou Zengqian, Tian Shihong, Yuan Zhongxin, et al. The Himalayan collision zone carbonatites in western Sichuan, SW China: Petrogenesis, mantle source and tectonic implication[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 2006b(in press).
- [18] 邓万明. 青藏高原北部新生代板内火山岩[M]. 北京:地质出版社, 1998. 1~179.
Deng Wanming. Cenozoic Intraplate Volcanic Rocks in the Northern Qinghai-Xizang plateau [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998.1~179 (in Chinese).
- [19] 邓万明. 中国西部新生代火山活动及其大地构造背景——青藏高原及邻区火山岩的形成机制[J]. 地学前缘, 2003, 10(2):471~478.
Deng Wanming. Cenozoic volcanic activity and its geotectonic background in west China——Formative excitation mechanism of volcanic rocks in Qinghai-Xizang and adjacent districts [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(2):471~478(in Chinese with English abstract).
- [20] Dewey J F. Extensional collapse of orogens[J]. Tectonics, 1988, 7: 1123~1140.
- [21] 张以葑, 郑健康. 青海可可西里及邻区地质概论[M]. 北京:地震出版社, 1994. 1~177.
Zhang Yifu, Zheng Jiankang. Geologic Overview in Kekshili, Qinghai and Adjacent Areas[M]. Beijing: Seismological Press, 1994. 1~177(in Chinese).
- [22] Wang E, Buechfiel B C. Interpretation of Cenozoic tectonics in the right-lateral accommodation zone between the Ailao Shan shear zone and the eastern Himalayan syntaxis[J]. Int. Geol. Rev., 1997, 39:191~219
- [23] Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, et al. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China[J]. Nature, 1990, 343:431~437.
- [24] Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier R, et al. Kinematics of Tertiary left-lateral shearing at the lithospheric-scale in the Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China)[J]. Tectonophysics, 1995, 251:3~84.
- [25] Turner S, Hawkesworth G, Liu J, et al. Timing of Tibetan uplift constrained by analysis of volcanic rocks[J]. Nature, 1993, 364: 50~54.
- [26] Hou Zengqian, Mo Xuanxue, Qu Xiaoming, et al. The mid-Miocene adakitic rocks generated during the east-west extension in south Tibet[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 2004, 220:139~155.
- [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 Ma ago[J]. Nature, 2001, 412:628~632.
- [29] 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.
- [30] Burchfiel B C, Chen Z, Hodges K V, et al. The south Tibetan detachment system, Himalayan orogen: extension contemporaneous with and parallel to shortening in a collisional mountain belt [J]. Geol. Soc. Am. Spec. Pap., 1992, 269: 1~41.
- [31] Schärer U, Xu R H, Allegre C J. U-(Th)-Pb geochronology of the Gangdese (Transhimalaya) plutonism in the Lhasa-Xigaza region, Tibet[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1986, 77:35~48.
- [32] Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, et al. Activation of the Nyainqentanghla shear zone: implication for uplift of the southern Tibetan Plateau[J]. Tectonics, 1995, 14:658~676.
- [33] Marignac C, Cunney M. Ore deposits of the French Massif Central: Insight into the metallogenesis of the Variscan collision belt[J]. Mineralium Deposita, 1999, 34:472~504.
- [34] Crawford A J, Corbett K D, Everard J. Geochemistry and tectonic setting of a Cambrian VMS-rich volcanic belt: the Mount Read Volcanics, W Tasmania[J]. Economic Geology, 1992, 87:597~619.
- [35] Hou Zengqian, Ma Hongwen, Zaw K, et al. The Himalayan Yu-

- long porphyry copper belt:Product of large-scale strike-slip faulting in eastern Tibet[J]. *Economic Geology*, 2003, 98:125~145.
- [36] 侯增谦,杨竹森,徐文艺,等. 青藏高原碰撞造山带:I. 主碰撞造山成矿作用[R]. 中国地质科学院地质研究所, 2006.
- Hou Zengqian, Yang Zhusen, Xu Wenyi, et al. Tibetan collision orogenic belt:I. Metallogenesis during the main-collisional epoch[R]. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Science, 2006.
- [37] 董方浏,侯增谦,高永丰,等. 滇西腾冲新生代花岗岩:成因类型与构造意义[J]. *岩石学报*, 2006, 23(4).
- Dong Fangliu, Hou Zengqian, Gao Yongfeng, et al., Cenozoic granitoid in Tengchong, western Yunnan:Genesis type and implication for tectonics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 23(4).
- [38] Kerrich R, Wyman D. Geodynamic setting of mesothermal gold deposits:an association with accretionary tectonic regimes[J]. *Geology*, 1990, 18:882~885.
- [39] Barley M E, Groves D I. Supercontinent cycles and the distribution of metal deposits through time[J].*Geology*,1992,20:291~294.
- [40] Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, et al. Orogenic gold deposits:A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types[J]. *Ore Geology Reviews*, 1998, 13:7~27.
- [41] 温春齐,多吉,孙燕,等. 西藏普兰县马攸木金矿床石英的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及其地质意义[J]. *地质通报*, 2004, 23(7):686~688.
- Wen Chunqi, Duo Ji, Sun Yan, et al. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of quartz from gold-bearing quartz veins in the Mayum gold deposit, Burang, Tibet, and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(7):686~688(in Chinese with English abstract).
- [42] 徐文艺,曲晓明,侯增谦,等. 西藏冈底斯中段雄村铜金矿床流体包裹体研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 2005, 24(4):301~310.
- Xu Wenyi, Qu Xiaoming, Hou Zengqian, et al. Fluid inclusion studies of the Xiongacun copper-gold deposit in central Gangdese, Tibet[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2005, 24(4):301~310(in Chinese with English abstract).
- [43] 唐仁鲤,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.
- 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 with English abstract).
- [44] 马鸿文.藏东玉龙斑岩铜矿带花岗岩类与成矿[M]. 北京:中国地质大学出版社,1994.1~158.
- Ma Hongwen. Granitoids and Mineralization of the Yulong Porphyry Copper Belt in Eastern Tibet[M]. Beijing:China University of Geosciences Press,1994.1~158 (in Chinese with English abstract).
- [45] 梁华英.青藏高原东南缘斑岩铜矿成矿研究取得新进展[J]. *矿床地质*, 2002, 21(4):365.
- Liang Huaying. New advances in the research on mineralization of porphyry copper deposits in south east margin of Qinghai-Xizang plateau[J]. *Mineral Deposits*, 2002, 21(4):365(in Chinese).
- [46] 杜安道,何红廖,殷万宁,等. 辉钼矿的铷-锶同位素地质年龄测定方法研究[J]. *地质学报*, 1994, 68(4):339~346.
- Du Andao, He Hongliao, Yin Wanning, et al. The study on the analytical methods of Re-Os age for molybdenites[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1994, 68(4):339~346(in Chinese with English abstract).
- [47] 张玉泉,谢应雯,邱华宁,等. 钾玄岩系列:藏东玉龙斑岩铜矿带含矿斑岩的 Sr, Nd 和 Pb 同位素成分[J]. *地质学报*, 1998, 33:359~366.
- Zhang Yuquan, Xie Yingwen, Qiu Huaning. Shoshonitic series: Sr, Nd, and Pb isotopic compositions of ore-bearing porphyry for the Yulong copper ore belt in eastern Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1998, 33:359~366 (in Chinese with English abstract).
- [48] 侯增谦,钟大赉,邓万明,等.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):1~14.
- Hou Zengqian, Zhong Dalai, Deng Wanming, et al. A tectonic model for porphyry copper-molybdenum-gold metallogenic belts on the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geology in China*, 2004, 31(1):1~14(in Chinese with English abstract).
- [49] Camus F, Dilles J H. A special issue devoted to porphyry copper deposits of northern Chile-Preface[J]. *Economic Geology*, 2001, 96:233~238.
- [50] 骆耀南,俞如龙,侯立纬,等. 龙门山-锦屏山陆内造山带[M]. 成都:四川科学技术出版社,1998. 1~171.
- Luo Yaonan, Yu Rulong, Hou Liwei, et al. Longmenshan-Jinpingshan Intracontinental Orogenic Belt [M]. Chengdu:Sichuan Science and Technology Press, 1998. 1~171 (in Chinese).
- [51] 张玉泉,谢应雯,梁华英,等.藏东玉龙斑岩铜矿带含矿斑岩及成岩系列[J]. *地球化学*, 1998, 27:236~243.
- Zhang Yuquan, Xie Yingwen, Liang Huaying. Petrogenesis series and the ore-bearing porphyries of the Yulong copper ore belt in eastern Tibet[J]. *Geochim.*, 1998, 27:236~243 (in Chinese with English abstract).
- [52] Bi Xianwu, Hu Ruizhong, Cornell D H. The alkaline porphyry associated Yao'an gold deposit, Yunnan, China:rare earth element and stable isotope evidence for magmatic-hydrothermal ore formation[J]. *Mineralium Deposita*, 2004, 39:21~30.
- [53] 田世洪. 青藏高原东缘喜马拉雅西稀土成矿带地质地球化学特征及其成矿动力学研究(博士论文)[D].北京:中国地质科学院,2005, 1~131.
- Tian Shihong. The Himalayan Mianxi REE metallogenic belt on the eastern margin of the Qinghai-Tibet plateau:geology, geochemistry and geodynamics of the mineralization (PhD candidate paper)[D]. Supervisor:Ding Tiping, Hou Zengqian. Beijing:Chinese Academy of Geological Science. 2005, 1~131(in Chinese with English abstract).
- [54] 袁忠信,施泽民,白鸽,等. 四川冕宁牦牛坪稀土矿床[M]. 北京:地震出版社, 1995. 1~150.
- Yuan Zhongxin, Shi Zemin, Bai Ge, et al. The Maoniuping Rare Earth Ore Deposit, Mianning County, Sichuan Province[M], Beijing: Seismological Press, 1995.1~150 (in Chinese with English abstract).

- [55] 刘丛强, 黄智龙, 许成, 等. 地幔流体及其成矿作用——以四川冕宁稀土矿床为例[M]. 北京:地质出版社, 2004. 1~229.
Liu Congqiang, Huang Zhilong, Xu Cheng, et al. Geofluids in the Earth's Mantle and its Role in Mineralization: A Case Study the Mianning REE Deposits, Sichuan Province, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004, 1~229(in Chinese with English abstract).
- [56] 牛贺才, 单强, 陈小明, 等. 攀西裂谷带轻稀土矿床与地幔过程关系[J]. 中国科学(D辑), 2002, 32(增刊):33~40.
Niu Hecai, Shan Qiang, Chen Xiaoming, et al. Relationship between light rare earth deposits and mantle processes in Panxi rift, China[J]. Science in China (Series D), 2003, S1: 41~49.
- [57] 许成, 黄智龙, 刘丛强, 等. 四川牦牛坪稀土矿床碳酸岩地球化学[J]. 中国科学(D辑), 2002, 32(8):635~646.
Xu Cheng, Huang Zhilong, Liu Chongqiang, et al. Geochemistry of carbonatites in Maoniuping REE deposit, Sichuan Province, China[J]. Science in China (Series D), 2003, 46(3):246~256.
- [58] 胡云中, 王海平, 唐尚鹁, 等. 哀牢山金矿地质[M]. 北京:地质出版社, 1995. 1~278.
Hu Yunzhong, Wang Haiping, Tang Shangchun, et al. Geology of the Ailaoshan Gold Deposits [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995. 1~278 (in Chinese).
- [59] 黄智龙, 王联魁, 朱成明. 云南老王寨金矿区煌斑岩岩石学研究[J]. 地质科学, 1997, 32:74~84.
Huang Zhilong, Wang Liankui, Zhu Chengming. Petrological study of lamprophyres in the Laowangzhai Gold mine, Yunnan[J]. Geological Sciences, 1997, 32:74~87 (in Chinese with English abstract).
- [60] 胡瑞忠, Turner G, Burnard P. 哀牢山金矿带成矿流体 He 和 Ar 同位素地球化学[J]. 中国科学, 1999, 29:321~330.
Hu Ruizhong, Turner G, Burnard P. He and Ar isotopic geochemistry of ore-forming fluids in the Ailaoshan gold belt[J]. Science in China, 1999, 29:321~330 (in Chinese).
- [61] 侯增谦, 高永峰, 孟祥金, 等. 西藏冈底斯中新世斑岩铜矿带: 埃达克斑岩成因与构造控制[J]. 岩石学报, 2004, 20(2):239~248.
Hou Zengqian, Gao Yongfeng, Meng Xiangjin, et al. Genesis of adakitic porphyry and tectonic controls on the Gangdese Miocene porphyry copper belt in the Tibetan orogen [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(2):239~248(in Chinese with English abstract).
- [62] 芮宗瑶, 曲晓明, 侯增谦, 等. 冈底斯斑岩铜矿成矿时代及青藏高原隆升[J]. 矿床地质, 2003, 21:217~225.
Rui Zongyao, Qu Xiaoming, Hou Zengqian, et al. Metallogenic epoch of the Gangdese porphyry copper belt and uplift of the Qinghai-Tibet plateau[J]. Mineral Deposit, 2003, 22:224~232(in Chinese with English abstract).
- [63] 芮宗瑶, 李光明, 张立生, 等. 西藏斑岩铜矿对重大地质事件的响应[J]. 地学前缘, 2004, 11(1):145~152.
Rui Zhongyao, Li Guangming, Zhang Lisheng, et al. The response of porphyry copper deposits to important geological events in Xizang [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(1):145~152 (in Chinese with English abstract).
- [64] 曲晓明, 侯增谦, 李振清. 冈底斯铜矿带含斑岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及地质意义[J]. 地质学报, 2003, 77(2):246~252.
Qu Xiaoming, Hou Zengqian, Li Zhenqing. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of porphyries from the Gangdese porphyry Cu belt in south Tibet and implication to geodynamic setting[J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(2):245~252 (in Chinese with English abstract).
- [65] 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, 2003, 33:509~618.
Hou Zengqian, Qu Xiaoming, Wang Shuxian, et al. Re-Os ages of molybdenite in the Gangdese porphyry copper belt in south Tibet: duration of mineralization and application of the dynamic setting[J]. Science in China, 2003, 33:509~618 (in Chinese).
- [66] 孟祥金, 侯增谦, 高永丰, 等. 西藏冈底斯东段斑岩铜矿铅锌成矿系统的发育时限: 帮浦铜多金属矿床辉钼矿 Re-Os 年龄证据[J]. 矿床地质, 2003, 22(3):246~252.
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(3):246~252(in Chinese with English abstract).
- [67] 曲晓明, 侯增谦, 高永丰, 等. 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(3):355~366.
Qu Xiaoming, Hou Zengqian, Gao Yongfeng, et al. Gangdese porphyry copper belt: the second “Yulong” porphyry Cu belt in Tibet? [J]. Mineral Deposits, 2001, 20(3):355~366 (in Chinese with English abstract).
- [68] 侯增谦, 莫宣学, 高永丰, 等. 埃达克岩: 斑岩铜矿的重要含矿母岩——以西藏和智利斑岩铜矿为例[J]. 矿床地质, 2003, 22(1):1~12.
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):1~12 (in Chinese with English abstract).
- [69] 张绮玲, 曲晓明, 徐文艺, 等. 西藏南木斑岩铜矿床的流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 2003, 19(2):251~259.
Zhang Qiling, Qu Xiaoming, Xu Wenyi, et al. Study of the fluid inclusions from Nanmu porphyry Cu-Mo deposit in Tibet [J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(2):251~259 (in Chinese with English abstract).
- [70] 杨志明, 谢玉玲, 李光明, 等. 西藏冈底斯斑岩铜矿带厅宫铜矿床流体包裹体研究[J]. 矿床地质, 2005, 24(6):584~594.
Yang Zhiming, Xie Yuling, Li Guangming, et al. Study of fluid inclusions from Tinggong porphyry copper deposit in Gangdise belt, Tibet [J]. Mineral Deposits, 2005, 24(6):584~594 (in Chinese with English abstract).
- [71] 杨志明, 谢玉玲, 李光明, 等. 西藏冈底斯斑岩铜矿带成矿流体的扫描电镜(能谱)约束——以驱龙和厅宫矿床为例[J]. 矿床地质, 2006, 25(2):147~154.

- Yang Zhiming, Xie Yuling, Li Guangming, et al. SEM/EDS constraints on the nature of ore-forming fluid of the deposits in Gangdese porphyry copper belt: Case studies of the Qulong and Tinggong deposits[J]. *Mineral Deposits*, 2006, 25(2):147~154.
- [72] Nelson K D, Zhao W J, Brown L D, et al. Partially molten middle crust beneath Southern Tibet: synthesis of Project INDEPTH results [J]. *Science*, 1996, 274:1684~1688.
- [73] Brown L D, Zhao W J, Nelson K D, et al. Bright spots, structure, and magmatism in Southern Tibet from INDEPTH seismic reflection profiling [J]. *Science*, 1996, 274:1688~1690.
- [74] Zhao W J, Mechie J, Guo J, et al. Seismic mapping of crustal structures beneath the Indus-Yarlung Suture, Tibet[J]. *Terra Nova*, 1997, 9:42~46.
- [75] 侯增谦,李振清. 印度大陆俯冲前缘的可能位置:来自藏南和藏东活动热泉气体 He 同位素约束[J]. *地质学报*, 2004, 78:482~493.
- Hou Zengqian, Li Zhenqing. Possible location for underthrusting front of the Indus continent: constraints from helium isotope of the geothermal gas in southern Tibet and eastern Tibet [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78:482~493 (in Chinese with English abstract).
- [76] 郑绵平,王秋霞,多吉,等. 水热成矿新类型-西藏铯硅华矿床[M]. 北京:地质出版社,1995. 1~114.
- Zheng Mianping, Wang Qiuxia, Duo Ji, et al. A New Type of Hydrothermal Deposit: Cs Sinter Deposits [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995.1~114 (in Chinese with English abstract).

Metallogenesis in the collisional orogen of the Qinghai-Tibet Plateau: Tectonic setting, tempo-spatial distribution and ore deposit types

HOU Zeng-qian¹, MO Xuan-xue², YANG Zhi-ming¹, WANG An-jian³,
PAN Gui-tang⁴, QU Xiao-ming⁵, NIE Feng-jun⁵

(1. *Institute of Geology, China Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

2. *China University of Geosciences, Beijing 100082, China;*

3. *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

4. *Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu, China;*

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

Abstract: Metallogeny of continents is an important research frontier in the contemporaneous metallogenic study, and its theoretical framework is conceived and established by gaining a deep knowledge and understanding of metallogeny in the continental collisional orogen. For a long time, geologists cannot reach a common view on the stages of collisional metallogeny and dynamic process in various stages because of a poor understanding of metallogeny in typical collisional orogens and coupling and genetic relations between the collisional orogenic process and crust/mantle interaction on the one hand and metallogenesis on the other. The Qinghai-Tibet Plateau orogen, which is characterized by the occurrence of large-scale, intense and young mineralization as well as many types of large and well-preserved deposit, is regarded as an ideal natural laboratory for studying ore-forming processes on continents and solving the above-mentioned problems. Through three years of systematical research on the metallogeny in the collisional orogen of the plateau, our project team has established a temporal-spatial framework of major mineralization events on the plateau, proposed a model of geodynamics and tectonic constraints on the ore-forming processes and put forward a set of complete theories on metallogeny in the collisional orogen. Three ore-forming processes and twelve deposit types are proposed in the new theories; they are: (1) metallogeny in the period of syn-collisional orogeny (65 - 41 Ma, four deposit types); (2) metallogeny in the period of late-collisional transformation (40 - 26 Ma, four deposit types); and (3) metallogeny in the period of post-collisional crustal extension (25 - 0 Ma, four deposit types). The corresponding key factors controlling the ore-forming processes are: (1) collisional orogenic setting, crustal magmatic activity and large-scale shear deformation; (2) intercontinental plate transformation setting, mantle-derived magmatic activity and large-scale strike-slip motion-nappe thrusting-shear deformation; and (3) post-collisional crustal extension setting, crust/mantle magmatic activity and hydrothermal convection system.

Key words: orogen; metallogeny; ore deposit type; temporal-spatial distribution; key controlling factor; Qinghai-Tibet Plateau

About the first author: HOU Zeng-qian, male, born in 1961, doctor and senior researcher, mainly engages in the study of metallogeny on continents and submarine hydrothermal ore-forming processes; E-mail: hzq@cags.net.cn.