

印度—亚洲大陆碰撞成矿作用主要研究进展

侯增谦¹⁾ 王二七²⁾

1) 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;
2) 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

摘 要 “印度—亚洲大陆主碰撞带成矿作用”973项目(2002~2008年)以青藏高原为研究对象,以构建大陆碰撞成矿理论体系为总体科学目标,经过70多位科技人员历经5年研究,取得了重大研究成果。笔者初步总结了项目在成矿动力学背景、壳幔深部过程、大陆成矿作用及战略新区预测等方面的研究进展。项目详细再塑了青藏高原碰撞造山过程,创新性提出了碰撞造山三阶段演化模式,即主碰撞聚合(65~41 Ma)、晚碰撞转换(40~26 Ma)、后碰撞伸展(25~0 Ma)三阶段连续演变历程,发现主碰撞期发生岩浆大规模底侵与地壳垂向增生,晚碰撞期出现地幔物质侧向流动与幔源钾质岩浆组合,后碰撞期出现岩石圈减薄与伸展岩浆组合。伴随碰撞过程,应力场出现自挤压(压扭)到伸展(张扭)交替更迭变化。综合研究提出了青藏高原碰撞造山地球动力学模式。创新性地提出了大陆碰撞成矿理论体系新框架,包括三大碰撞成矿作用(主碰撞汇聚成矿作用、晚碰撞转换成矿作用和后碰撞伸展成矿作用)、10种重要的成矿系统和12种大陆特色的矿床类型,揭示了大陆碰撞带的区域成矿规律。初步提出了以大陆型斑岩铜矿新理论为代表的5类矿床成矿新模型,揭示了大陆碰撞带金属成矿机制。在系列地质、矿产综合编图和数据库建设基础上,提出了成矿预测新思路和新方法,提交了7处找矿战略新区,并在若干靶区取得找矿突破,探索出一条科研带动勘查突破、勘查提升理论认识的新路。

关键词 碰撞造山; 成矿作用; 成矿模式; 成矿预测
中图分类号: P542.4 P612 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-3021(2008)03-275-18

Metallogenesis of the Indo-Asian Collisional Orogen: New Advances

HOU Zengqian¹⁾ WANG Erchi²⁾

1) Institute of Geology Chinese Academy of Geological Sciences Beijing 100037;
2) Institute of Geology and Geophysics Chinese Academy of Sciences Beijing 100029

Abstract For the purpose of understanding metallogenesis of continental collisional zones, a five-year national program entitled Metallogenesis of the Indo-Asian Continental Collision Zone (973 Project) was established in 2002 and about 70 researchers from nine institutions of China joined this project. This paper summarizes some new advances in the study of geodynamic setting, deep lithospheric processes and relevant metallogeny of the Tibetan collisional orogenic belt. Three aspects of significant advances have been made in this project, i.e., ① the tectonomagmatic evolution of the collisional orogen; ② the collisional metallogenic theory; ③ the evaluation of mineral perspectives in the orogen. Based on the studies of the tectonomagmatic activities and relevant lithospheric processes, the authors proposed a three-stage tectonic model for the Tibetan collisional orogen, from the main collisional convergence (65~41 Ma) through the late collisional tectonic transform (40~26 Ma) to the post collisional extension (25~0 Ma) processes. Studies show that the main collisional process resulted in large-scale underplating of syn collisional mantle-derived magmas and relevant crustal vertical growth in the main collisional zone, and the late collisional process triggered lateral flow of subcontinental lithospheric mantle and created mantle

本文由 973 项目“青藏高原碰撞与成矿”(编号: 2002CB412600)资助。
收稿日期: 2008-05-29 改回日期: 2008-06-05 责任编辑: 刘志强。
第一作者简介: 侯增谦,男,1961 年生,研究员,博士生导师,主要从事海底与大陆成矿作用研究;通讯地址: 100037,北京市西城区百万庄大街 26 号;电话: 010-68990617; E-mail: houzengqian@126.com
(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

derived potassic rock suites on the eastern margin of the orogen whereas the post collisional extension related to lithospheric mantle thinning produced ultra-potassic and potassic suites and leucogranites along the collisional zone. Each collisional period usually underwent a transition from the compressional (transpressional) to the extensional (transtensional) regime in the collisional orogen. Based on studies of the spatial-temporal evolution of tectono-magmatic associations and related mineralization in major metallogenic belts within the orogen, the authors advanced a theory framework for metallogeny of the collisional orogen. It includes three major kinds of metallogenesis, i.e., main collisional convergent metallogeny, late collisional transform metallogeny and post collisional extensional metallogeny, which produced ten significant ore-forming systems and twelve typical deposit types. Based on the studies of several typical ore deposits in the Tibetan orogen, the authors established five new models for the ore deposits, such as the porphyry Cu deposits unrelated to subduction, the thrust controlled Pb-Zn-Ag-Cu deposits, the collisional orogenic Au deposits, the REE deposits unrelated to rifting and the detachment system-controlled Sb-Au deposits. By compilation of a series of geological maps and utilization of mineral resource database, the potential of mineral resources in the orogen has been evaluated and some perspective areas have been delineated by using new methods proposed in this project.

Key words collisional orogen; metallogeny; deposit model; perspective

大陆成矿作用是当代成矿学的重大研究前沿,是国际矿床学界的研究热点。其原因在于,基于经典板块构造而建立的成矿理论体系虽然已日臻成熟,但就像板块构造“难以登陆”一样,在解释大陆环境(特别是大陆碰撞带和陆内环境)成矿作用上也遇到了重大挑战,迫切需要建立全新的大陆成矿理论体系。构建大陆成矿理论体系,关键要阐明大陆碰撞带的成矿理论问题。矿床学家们很早就致力于碰撞造山带的成矿作用研究(Mitchell et al., 1981; Sawkins, 1990; Selmann et al., 1994; 陈衍景等, 1999),但研究对象多为古老的碰撞造山带,其成矿时代老,保存条件差,矿床类型单一且规模较小,难以勾画出碰撞造山成矿系统的整体轮廓,加之对碰撞造山与成矿耦合作用缺乏深入系统的研究,始终没有建立起系统完整的理论体系。

印度—亚洲大陆碰撞形成的青藏高原碰撞造山带,以其正在进行中的碰撞造山作用、清楚明确的板块边界、各种标示性的各种地质特征,以及成矿规模大、形成时代新、矿床类型多、保存条件好等鲜明特点,成为系统研究大陆成矿作用、创新大陆碰撞成矿理论的天然实验室。特别是青藏高原大陆碰撞带内鲜为人知的成矿环境、世界级规模的成矿区带、巨量规模的金属工业堆积、异常复杂的壳幔元素组合和独具特色的成矿过程,显著区别于世界范围的已知矿床,不能被基于其他造山带研究得出的成矿模型所涵盖(侯增谦等, 2003),为中国学者创新大陆碰撞成矿理论、走向国际成矿学研究前缘并做出实质性的理论贡献提供了难得的机遇。为此,科技部于2002年启动了“印度—亚洲大陆主碰撞带成矿作用”973项目。来自9个国家级科研单位和高等院校的70多位学者参加这项为期5年的基础研究计

划项目。

1 项目研究概述

该项目围绕“创新大陆碰撞成矿理论框架,完善相应的矿产资源评价体系”总体科学目标,以印度—亚洲大陆主碰撞带内重要成矿构造单元为野外实验室,以陆—陆碰撞过程中的成矿作用研究为核心,按照成矿背景—成矿系统—形成机制—改造过程—潜力预测研究思路,采用多学科交叉、深部探测、数字模拟等多技术方法融合和四维综合分析等途径,查明陆—陆碰撞不同阶段的成矿动力学背景和成矿环境,揭示各主要成矿系统的时空结构与主要矿床类型;阐明不同构造背景下的壳幔作用过程与成矿机理,创新大陆碰撞成矿理论,建立大陆碰撞造山带区域成矿模型;探索大陆碰撞带成矿预测和潜力评价的新方法和新途径,建立和完善矿产资源评价体系。

项目实施5年来,完成如下重要工作:①测制完成了一条东西长600余公里,南北非纵线长达200余公里的人工地震宽角反射/折射剖面测量,以及一条500 km长的大地电磁测深剖面;②对青藏高原9条重要的构造带进行了成矿地质背景、构造变形、火山—岩浆作用和动力学演化研究;③对青藏高原6条重要的成矿带和一系列典型矿床进行了系统的地质调查和深入解剖;④系统编制了青藏高原主碰撞带的地质图、构造纲要图、矿产分布图、岩浆岩分布图、成矿规律图和成矿预测图等;⑤初步建立了青藏高原3000余个矿床矿点数据库,提出了7处具有较大找矿前景的战略新区,并在一些新区取得了找矿突破,为青藏高原矿产资源勘查评价提供了理论指导和决策依据。

项目实施 5 年来,共产出学术论文 360 余篇,其中,SC 收录论文 180 余篇。出版专集 6 部,其中,《岩石学报》4 部,《地质学报》1 部,《矿床地质》1 部。英文专集即将在国际权威刊物《Ore Geology Review》出版(Hou Z-Q and Cook N 主编)。3 人成为国家自然科学杰出青年基金获得者,8 人入选国家和部级人才计划。1 项成果已荣获教育部科技成果一等奖。

2 主要研究进展

2.1 碰撞造山作用与成矿构造背景研究取得突破性进展

自 20 世纪 70 年代以来,一系列单边和大型国际合作项目,把青藏高原推向世界,掀起了世界科学家既相互合作又激烈竞争的研究热潮,取得了一系列重大成果(Chang et al., 1986; 肖序常等, 1988; 曾融生等, 1992; Zhao et al., 1993; 滕吉文等, 1994; Xu et al., 1998; 钟大赉等, 1998; Yin et al., 2000; 郑度等, 2006; 许志琴等, 2006), 详细刻画了青藏高原的结构构造、变形特征和隆升机制,提出了多种大陆动力学模型,如:印度地壳向北注入模型(Zhao et al., 1985); 印度地幔岩石圈向亚洲俯冲模型(Powell 1986; Owen et al., 1997); 亚洲大陆岩石圈向南俯冲模型(Willett et al., 1994); 分布式缩短增厚模型(Chang et al., 1986; England et al., 1988; Dewey et al., 1988); 大型走滑—逃逸模型(Tapponnier et al., 1990); 周边俯冲模型(Xu et al., 1999)等。然而,仍有大量涉及青藏高原形成演化的重要科学问题有待于研究解决,比如:陆陆碰撞的时限、详细碰撞过程与机制、藏南拆离系发育机制、NS 向裂谷系统成因、地壳加厚的时间与机制、下地壳“隧道流”发育时限等。从区域成矿角度,也有一些重大基础地质问题尚未解决,如,大陆碰撞过程与成矿耦合关系、大规模成矿的大陆动力学过程、巨型成矿带的地质背景与成矿环境、成矿系统与大型矿床的关键控制要素等。下面主要简述本项目成员在下述方面取得的重要研究进展。

2.1.1 详细再塑了青藏高原碰撞造山过程,提出了碰撞造山三阶段演化模式,深化了对大陆碰撞造山过程与机制的理解

通过青藏高原重要地质事件的时空标定、构造—岩浆组合研究和详细碰撞过程分析,发现印度—亚洲大陆碰撞造山过程具有明显的三段性,首次提出青藏高原大陆碰撞造山带经历主碰撞汇聚

(65~41 Ma)、晚碰撞转换(40~26 Ma)和后碰撞伸展(25~0 Ma)3 个阶段连续演化历程,初步阐明了各碰撞阶段的地壳变形、岩浆活动、壳幔作用和深部过程及其动力学。

(1)主碰撞汇聚:研究表明,印度—亚洲大陆主碰撞汇聚始于 65 Ma(Mo et al., 2002; 莫宣学等, 2003; Ding et al., 2005),延续至 41 Ma(侯增谦等, 2006),形成了以藏南前陆冲断带、冈底斯主碰撞构造—岩浆带和藏北陆内褶皱—逆冲带为特征的青藏高原碰撞造山带主体。主碰撞期不仅表现为大陆对接拼合、大陆俯冲与地壳缩短,而且发生大规模岩浆底侵与地壳垂向增生,导致地壳增厚(莫宣学等, 2003; Hou et al., 2004; Mo et al., 2007)。主碰撞岩浆作用主要集中于亚洲大陆南缘—冈底斯带,形成①壳源白云母花岗岩—钾质钙碱性花岗岩组合(66~50 Ma)(董方浏等, 2006)、②+εNd 花岗岩—辉长岩组合(52~47 Ma)(Mo et al., 2005)和③幔源玄武质次火山岩—辉绿岩脉组合(42 Ma)(高永丰等, 2006; Gao et al., 2008),以及大面积分布的巨厚(5000 m)的林子宗火山岩系(64~43 Ma)(莫宣学等, 2003; Zhou et al., 2004),反映主碰撞带深部相继发生大陆板片俯冲(65~52 Ma)→板片断离(52~42 Ma)→板片低角度俯冲(<40 Ma)等重要过程(侯增谦等, 2006)。

(2)晚碰撞转换:晚碰撞作用发生于印度与亚洲大陆的持续汇聚和南北向挤压背景之下,以沿巨型剪切带的块体间水平相对运动为特征,在高原东缘发育大规模的走滑断裂系统、大规模剪切系统和逆冲推覆构造系统,导致块体大幅旋转和小幅滑移(Wang et al., 2006a, 2008; Wang et al., in press)以及区域尺度的地壳缩短(Wang et al., 1997, 2001; 刘俊来等, 2006; He et al., 2008),调节和吸纳了印度—亚洲大陆碰撞的应力应变,行使构造转换之功能。晚碰撞期陆内俯冲可能诱发了地幔物质侧向流动(Mo et al., 2006)和深部软流圈上涌(Hou et al., 2005, 2006),形成由富碱斑岩和钾质—超钾质岩浆岩带、钙碱性煌斑岩群和碳酸岩—正长岩杂岩带构成的幔源钾质火成岩省(Hou et al., 2006),岩浆活动高峰集中于(35±5) Ma。

(3)后碰撞伸展:后碰撞构造—岩浆活动主体发育于 NS 向挤压的动力背景之下,早期阶段主要发生下地壳流动与上地壳缩短(>18 Ma);下地壳塑性流动并向南挤出,在藏南地区形成 EW 延伸的藏南拆离系(SID)和高喜马拉雅(Wang et al.,

2006, 2007), 上地壳缩短, 在拉萨地体发育 EW 向展布的逆冲断裂系 (叶培盛, 2004); 晚期阶段主要发生地壳伸展与裂陷 ($< 18 \text{ Ma}$); 垂直碰撞带的 EW 向伸展, 形成一系列横切青藏高原的 NS 向正断层系统 ($14 \sim 10 \text{ Ma}$) 及其围陷的裂谷系和裂陷盆地 (丁林等, 2006)。后碰撞岩浆作用以发育与俯冲板块撕裂和岩石圈减薄有关的伸展岩浆组合为特征, 主要形成钾质—超钾质火山岩、富钾埃达克质岩、钾质钙碱性花岗岩与淡色花岗岩 (Ding et al., 2003; Chung et al., 2003; Hou et al., 2004; Mo et al., 2006; 赵志丹等, 2006; 侯增谦等, 2006b; 陈建林等, 2006, 2007; Gao et al., 2007a, 2007b; Liao et al., 2007), 集中发育于冈底斯构造—岩浆带和藏南特提斯喜马拉雅。淡色花岗岩受藏南拆离系 (SID) 控制, 其它钾质—超钾质岩浆活动则与 EW 向地壳伸展有关。

研究发现不同碰撞阶段的应力场发生周期性或旋回性变化, 主碰撞阶段早期为碰撞挤压 ($65 \sim 52 \text{ Ma}$), 晚期出现伸展松弛 ($52 \sim 41 \text{ Ma}$) (岳雅惠等, 2006; 侯增谦等, 2006c), 晚碰撞阶段早期主体为逆冲推覆 ($40 \sim 38 \text{ Ma}$), 晚期总体为走滑剪切 ($36 \sim 26 \text{ Ma}$) (刘俊来等, 2006; 侯增谦等, 2006d), 后碰撞阶段早期为侧向挤出 ($25 \sim 18 \text{ Ma}$), 晚期发生伸展张裂 ($18 \sim 0 \text{ Ma}$) (侯增谦等, 2006c)。综合研究提出了青藏高原碰撞造山过程的地球动力学模式 (Ding et al., 2003; 赵志丹等, 2003, 2006; 侯增谦等, 2006a; Mo et al., 2006)。

2.1.2 对一些关键科学问题提出了新认识和新见解, 深化了青藏高原形成演化过程的认识和理解

(1) 重新厘定主碰撞带的大地构造, 提出了大陆碰撞前多岛弧盆构造格架 (潘桂棠等, 2006): 从研究区晚古生代开始, 特别是中生代以来的弧盆系统演化和弧—弧、弧—陆碰撞过程中各构造单元的构造属性和时空结构研究入手, 初步识别出主碰撞带发育如下大地构造单元: 南羌塘和左贡前陆盆地、班公湖—怒江结合带、昂龙岗日—班戈—伯舒拉岭岩浆弧、狮泉河—永珠—嘉黎结合带、冈底斯—念青唐古拉岩浆弧、日喀则弧前盆地、雅鲁藏布结合带和喜马拉雅特提斯褶冲带 8 个主要的构造单元。根据各主要构造单元的地层、岩浆成因类型和构造属性及其演化的差异还可划分出 26 个次级构造单元。以此为依据, 编制了青藏高原主碰撞带新一代地质图和构造格架图。

(2) 提出大规模岩浆底侵作用是高原地壳垂向增生和地壳加厚的主导机制之一。从岩浆作用的角度, 探讨了青藏高原双倍于正常厚度的巨厚地壳的成因。巨厚陆壳是青藏高原最显著的特点之一, 因而也是国际瞩目的前沿课题。应用同碰撞的冈底斯花岗岩与林子宗火山岩系作为“探针”和示踪, 及底侵—岩浆混合作用证据, 明确地提出“两类地壳、两种机制”的新认识: ①主碰撞带存在两类地壳: 新生地壳与再循环地壳 (莫宣学等, 2005); ②存在两种地壳增厚机制: 挤压缩短增厚及地幔物质 (通过岩浆作用) 注入增厚 (Hou et al., 2004; Mo et al., 2005, 2008), 并估算了二者的贡献率 (Mo et al., 2007)。以往文献中对前一种 (挤压缩短) 增厚机制研究较多, 而对后一种机制 (特别是其定量研究) 涉及甚少; ③提出碰撞以来的主要加厚期在 $50 \sim 25 \text{ Ma}$ 之间 (Mo et al., 2007)。

(3) 查明主碰撞带活动裂谷系的构造特征、发育时限及形成机制: 数条垂直剖面的研究揭示, 其主要活动时间范围为 $8 \sim 23 \text{ Ma}$ (丁林等, 2006)。裂谷的活动是阶段性的, 主要集中在 $18 \sim 13 \text{ Ma}$ 平面上, 裂谷为锯齿状断裂系, 包括 NE、NW、NS 向 3 组断裂。边缘断裂都为走滑性质的正断层, 运动线理与断裂走向高角度斜交。断离多为高角度正断层。剖面上, 冈底斯地块中主要为对称的地堑型, 在喜马拉雅地块中表现为半地堑。正断裂末端多转换为走滑断裂, 并与其他 NS 向裂谷相连。裂谷的宽度变化于 $5 \sim 35 \text{ km}$ 。NS 向裂谷切割了东西向褶皱和逆冲断裂等构造, 因而裂谷发生在高原地壳构造加厚之后, 对高原地壳加厚过程及机制提供了时间约束。裂谷破坏了高原夷平面, 开始新一轮的地貌旋回, 因而主夷平面应发育在裂谷之前。裂谷不仅是上部地壳的伸展, 同时裂谷中出现大量火山岩, 深部过程在裂谷的形成上起主导作用。提出 EW 向地壳的伸展是 SN 向挤压和深部岩石圈结构调整的产物 (丁林等, 2006)。这一认识得到地球物理探测资料的初步证实。

(4) 查明藏南拆离系形成时间和动力机制: 藏南拆离系的形成时间以及形成方式或成因机制是国际研究的热点或难题, 通过野外精细的 $1: 50000$ 构造填图研究和 21 个 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄测定, 获得了与 SID 直接相关的快速冷却时间为 $16 \sim 15 \text{ Ma}$ 与相应的变形的浅色花岗岩的形成相联系, 确定藏南聂拉木一带的伸展断层的形成时间为 $16.8 \sim 15 \text{ Ma}$ (Wang et al., 2006b, 2007)。提出伸展断层的形成

是由于同期的 MCT 及高喜马拉雅结晶岩体向南挤出 (extrusion) 而形成的, 是一个被动向北伸展的产物 (Passive unroofing)。

(5) 发现东碰撞带下地壳流动新证据: 地壳增厚是印度和欧亚大陆的碰撞效应, 局部增至近 80 km。地壳增厚意味着地壳温压的增高, 下地壳无疑呈塑性状态, 在这种状态下, 下地壳极易流动, 其形成、流动和演化对青藏高原的隆升、增生以及成矿作用有关键性贡献, 近年来成为国际研究的热点。前人的研究仅限于数值和构造模拟。根据对主碰撞带及其邻近地区如喜马拉雅、红河—哀牢山以及龙门山下地壳岩变形, 相关的沉积作用以及热演化的初步研究, 确定在三江地区, 下地壳岩形成于渐新世—中新世 (37 ~ 17 Ma), 并向东流动; 在喜马拉雅山, 下地壳岩形成于中新世 (24 Ma), 向南流动; 在龙门山, 下地壳岩形成于中晚中新世 (12 Ma), 向东流动。断裂上盘的金、锌等矿化可能受控于下地壳形成和运动 (Wang et al., 2006)。

(6) 提出高原东缘旋转构造式样与形变机制: 印度相对于华南的向北运动产生一对近南北向右行剪切力偶, 位于其间的青藏高原东南缘必定要发生顺时针旋转, 旋转运动有两种类型, 一类是书斜式, 另一类是同心圆式。临沧花岗岩基、兰坪—思茅盆地和楚雄盆地的旋转是书斜式, 属于局部性旋转; 同心圆式旋转以喜马拉雅东构造结为枢纽, 规模很大, 包括整个青藏高原东南缘。其中, 以红河—哀牢山剪切带为界, 存在两个同心圆旋转构造域: 一个是位于剪切带以南的三江—东南亚构造域, 印缅弧形山系构成其前锋, 形成于第三纪早中期, 目前仍在活动。由于旋转运动, 青藏高原东南边缘沿一系列逆掩断层向西运动, 主碰撞带的东南延伸部分, 其中包括南特提斯海三叠系复理石、雅鲁藏布江蛇绿岩和冈底斯岩浆岩近水平地被拆离开, 上部被推到印缅山系, 根部保留在密支那一带, 造成构造重复; 另一个位于剪切带以北的川滇构造域, 形成于晚新生代, 其东缘沿鲜水河—小江左行走滑断裂运动, 如果旋转持续进行, 红河—哀牢山剪切带将被切断, 这两个构造域将合并成为一个新的旋转构造域 (Wang et al., 2008)。

2.2 区域岩浆作用与壳—幔交换研究取得重要进展

(1) 发现了一批具有重大地球动力学意义的岩石和岩石组合: 首次在藏南发现金云母二辉橄榄岩—辉长苏长岩组合。边部为辉长苏长岩, 中间相为金云母二辉橄榄岩或金云母橄榄二辉岩。系统的

SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究确认该区存在大面积岩浆活动 ($> 40000 \text{ km}^2$), 发生在 145 ~ 128 Ma, 峰期为 (132 Ma) 结合大面积中生代火山岩系, 提出其可能为大火成岩省, 可能指示南印度洋 Kerguelen 地幔柱早在早白垩世就开始了其孕育演化历史 (Zhu et al., 2007, 2008)。由此证实 Kerguelen 地幔柱在 $> 130 \text{ Ma}$ 就开始了孕育活动, 表明该地幔柱在东冈瓦纳大陆 (印度、澳大利亚和南极洲) 裂解过程中发挥了积极主动作用。在高喜马拉雅结晶杂岩带, 发现火成碳酸岩, 研究提出, 该火成碳酸岩起源于沉积大理岩的部分熔融作用, 形成于结晶杂岩的折返过程之中 (Liu et al., 2006)。该项发现对探讨喜马拉雅造山演化过程具有重要的意义; 在拉萨地体许如错—当若雍措南北向裂谷带内首次发现富 SiO_2 煌斑岩, 属碰撞造山带型的富 SiO_2 煌斑岩, 具有明显不同与钾质岩的岩浆源区。研究提出其岩浆源区并非陆下岩石圈地幔, 而是孤立于软流圈地幔中的消减大洋沉积 (Gao et al., 2007b)。在高原北部羌塘地区和冈底斯带, 分别发现富 Na 质的埃达克岩 (许继峰等, 2003) 和富钾埃达克质岩 (Gao et al., 2003; Hou et al., 2004; Wang et al., 2005), 这套岩石在青藏高原属首次发现, 对已有的高原隆升和伸展构造模式提出了挑战。继青藏高原东北缘 (甘肃礼县, 喻学惠等, 2001)、西北缘 (新疆康西瓦, Luo et al., 2001) 发现幔源橄榄岩包体之后, 又在 1:25 万区调发现的基础上, 对拉萨地块南部 (西藏赛利普) 18 Ma 超钾质火山岩所携带的幔源尖晶石—二辉橄榄岩包体做了进一步研究与发掘 (赵志丹等, 2008; 孙晨光等, 2008)。这些直接来自上地幔的“使者”的发现和认识, 为认识青藏高原上地幔的组成、状态及深部作用过程提供了极为宝贵的“探针”和“窗口”。

(2) 对青藏高原岩石圈和上地幔构成及不均一性提出了新的认识和证据: 对雅鲁藏布蛇绿岩带中基性岩 1000 多公里的系统取样和分析研究, 证明特提斯地幔地球化学域, 具有与现今印度洋地球化学域同样的属性, 以具有低 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的 DUPAL 异常为特点 (Zhang et al., 2005)。对幔源火山岩的研究揭示, 高原地幔至少存在 3 种地球化学端元: ①新特提斯大洋岩石圈端元; ②印度陆下岩石圈端元; ③新特提斯闭合前青藏原有的岩石圈端元, 这 3 种地球化学端元以不同比例存在于高原的不同地域, 并发生着相互作用 (Mo et al., 2006; 赵志丹等, 2007)。高原岩石圈自印度—亚洲碰撞以来经历了

3个演化阶段。根据大量地质及地球物理资料,可以识别出青藏高原现今存在3种岩石圈类型:①增厚的岩石圈;②减薄的岩石圈;③加厚—减薄—再加厚的岩石圈(Mo et al., 1999; Deng et al., 2004)。对地幔橄榄岩包体的研究表明,赛利普橄榄岩包体(赵志丹等, 2008)来自约70 km深处,显示类似裂谷环境的高地温(对应于中新世时高原南部的东西向伸展—裂解作用);西秦岭橄榄岩包体来自90~120 km深度,由中新世钾霞橄黄长岩携带,喻学惠等(2004)认为,岩浆发生的机制可能是似地幔柱的软流圈上隆。已获得的地幔橄榄岩包体均含有金云母等含水矿物,寄主火山岩也都富钾、 H_2O 不相容元素,暗示高原下的地幔普遍经历过交代作用。

(3) 提出主碰撞带经历过3个岩浆作用及3种不同的壳—幔作用过程:详细建立了青藏高原火山—岩浆作用事件序列,准确标定了其时空坐标,提出印—亚大陆碰撞始于65 Ma,划分出碰撞前(>65 Ma)、碰撞期(含晚碰撞)(65~26 Ma)、后碰撞期(<25 Ma)3个构造—岩浆期次及其时空分布规律(莫宣学等, 2003; Mo et al., 2006, 2007)。通过区域岩浆作用与深部过程研究,提出印度—亚洲大陆碰撞(~65 Ma)以来,主碰撞带大体经过3次重大的壳—幔相互作用事件:①以幔源岩浆底侵—壳—幔源岩浆混合作用为特色,形成冈底斯花岗岩基主体及相关的金属成矿作用,其高峰期为50 Ma左右(Dong et al., 2005; Mo et al., 2005; 董国臣等, 2008);②以碰撞后大规模走滑诱发的地幔上隆及横向流动为特色,形成高原东部的玉龙斑岩铜矿带、滇西富碱斑岩—火山岩及铜金成矿、兰坪—思茅盆地银多金属成矿,其高峰期为35~40 Ma;③以岩石圈拆沉作用、挤压向伸展转换为特色,形成冈底斯斑岩铜矿带、冈底斯钾质—超钾质火山岩、SN向张性构造等,其高峰期为14~20 Ma(莫宣学等, 2006; 侯增谦等, 2006 b)。

(4) 发现岩石圈挤出与软流圈上涌的岩石学新证据:对高原东缘新生代岩浆岩的形成及产出的动力学背景研究,发现区内存在两类不同的基性火山岩:①橄榄玄武岩、粗面岩、粗面安山岩以及煌斑岩都富钾($K_2O > 3.0 \text{ wt}\%$, $K_2O/Na_2O > 1$),显示Nb-Ta-Ti的负异常和Sr/Pb正异常,非常类似于藏北钾玄岩;②苦橄质玄武岩则以低钾为特征($K_2O < 0.5 \text{ wt}\%$, $K_2O/Na_2O < 1$),显示Nb-Ta-Ti的正异常和Sr异常。两种不同性质的火山岩可能反映了滇西新生代时期存在两种岩浆作用机制,前者与

岩石圈地幔的早期交代富集作用有关,代表的是印度—欧亚大陆碰撞引起的岩石圈向东南挤出块体,而后者则可能是岩石圈减薄后软流圈物质上涌的结果(Xu et al., 2008 a)。

(5) 发现印度板块发生断离的岩石学证据:在冈底斯中段发现42 Ma的苦橄质—高MgO玄武岩,呈次火山岩产出, SiO_2 介于42%~52%,REE呈平坦型配分型式,相对富LILE(高永丰等, 2006)。研究提出其可能来源于软流圈(Gao et al., 2008)。在高黎贡带发现一套形成于40~42 Ma的基性岩脉,以高FeO、 TiO_2 、低 K_2O 含量为特征。虽然多数样品经历了不同程度的地壳混染,少量样品的Nb/La大于1,La/Yb值较小和Mg/HJ值较高,显示了似洋岛玄武(ORB)的地球化学特征,从而为研究区提供了软流圈上涌的岩石学证据。模拟计算进一步暗示高黎贡基性岩脉的源区在尖晶石相橄榄岩中(<70 km),说明软流圈地幔上涌到很浅的部位,这与目前青藏高原巨厚的岩石圈(>120 km)形成鲜明对比。因此,~42 Ma高黎贡基性岩浆活动记录了研究区陆—陆碰撞后特殊的构造演化阶段。高黎贡带基性岩脉与达孜—甲马基性次火山岩(Gao et al., 2008)在形成时间和地球化学性质上一致,两者均代表了软流圈上涌熔融的直接产物(Xu et al., 2008 b)。研究提出,软流圈上涌是俯冲的印度板块在发生板片断离过程中透过“断离窗”发生的(Gao et al., 2008),这种深部板片断离过程导致了主碰撞晚期阶段应力场出现松弛和伸展的重要机制(侯增谦等, 2006 a)。

(6) 提出了青藏高原岩浆作用的地球动力学演化新模型:通过对拉萨地块地壳基底岩石、花岗岩和火山岩的研究,揭示出拉萨地块至少存在3种岩浆作用类型(按源区特征及亲缘性),即特提斯洋壳亲缘型、拉萨地块内部亲缘型和喜马拉雅亲缘型(莫宣学等, 2006)。对拉萨地块后碰撞钾质与超钾质岩石系统的岩石学与地球化学研究,揭示了印度沿着雅鲁藏布缝合带向北俯冲的俯冲带结构,提出了大陆板片俯冲差异性认识。认为印度板块北缘在西部地区俯冲到达或者超过班公湖—怒江缝合带,而在日喀则—拉萨地区则没有发现印度大陆地壳物质的俯冲和再循环痕迹,在此基础上,提出了岩浆作用地球动力学演化新模型(赵志丹等, 2003, 2006; 侯增谦等, 2006 a, 2006 b; Mo et al., 2006)。

(7) 提出了高黎贡构造带构造—岩浆演化机制:发现高黎贡带主要有3期岩浆活动:东北高黎贡

地区为 116~126 Ma 的黑云母二长花岗岩、黑云母花岗岩为主体, 西南腾梁花岗岩以梁河为界, 东侧是 68~76 Ma 的花岗岩, 西侧为 52~53 Ma 左右的新生代花岗岩。根据高黎贡—腾梁构造带与拉萨地块岩浆活动的对比, 发现高黎贡早白垩花岗岩无论在侵位年龄、成分上与拉萨地块的北部岩浆岩带相似, 其形成时代与中特提斯怒江洋的封闭时间相吻合, 是中特提斯怒江洋洋壳俯冲碰撞过程中加厚地壳熔融的产物。腾梁晚白垩花岗岩可能代表了平行于 Indo-Burma 岛弧岩浆带、分布于陆内壳源过铝质花岗岩带。其形成机制类似于北美 Cordillera Interior 带的形成, 可能与俯冲过程没有直接的联系, 而是因俯冲过程导致的陆内挤压—逆冲地壳加厚的结果。在时间上腾梁晚白垩花岗岩对应于拉萨地块冈底斯带岩浆活动的间隙期。这种差异与两个地区大洋板块俯冲角度不同有关。这一时期冈底斯带无岩浆活动可能与新特提斯洋板块的平俯冲有关, 而新特提斯洋板块以正常角度向腾梁地区的俯冲。因此新特提斯洋板块在两个地区的俯冲角度不同, 可能存在板块的撕裂, 其位置对应于未来的喜马拉雅东构造结 (Xu et al., 2008b)。

2.3 大陆成矿作用研究取得突破性进展

2.3.1 创新提出了大陆碰撞带成矿理论体系新框架, 为成矿学发展作出贡献

通过青藏高原重要成矿事件的时空坐标厘定和重要成矿作用综合分析, 系统提出了大陆碰撞成矿理论体系, 初步建立了各套成矿系统的地球动力学模型或构造控制模型 (侯增谦等, 2006c, 2006d, 2006e, 2008a, 2008b)。大陆碰撞成矿理论体系包括 3 大成矿作用, 即主碰撞汇聚成矿作用、晚碰撞转换成矿作用和后碰撞伸展成矿作用, 其形成 10 个重要的成矿系统及其 12 种典型矿床类型。

主碰撞汇聚成矿作用发生在陆陆对接碰撞和大陆俯冲阶段, 产于大陆汇聚环境, 系由地壳缩短加厚、峰期变质作用和壳源及壳幔岩浆活动等主导因素诱发的成矿作用及其形成的成矿系统。在青藏高原, 主碰撞期 (65~41 Ma) 的大陆碰撞与峰期变质、地壳加厚与陆壳深熔、壳幔作用与幔源岩浆, 导致与 A 矿成矿有关的峰期变质与构造剪切、与 W-Sn 稀有金属成矿有关的壳源花岗岩系列以及与 Cu-Au 多金属成矿有关的壳幔混源花岗岩系列, 分别形成造山型 A 矿 (江思宏等, 2008; Jiang et al., 2008)、壳源低 O_2 花岗岩浆—热液型 Sn 矿和壳幔混源高 O_2 岩浆—热液型 Cu-Au-Pb-Zn-Mo-F 矿床 (侯增谦

等, 2006b; 李光明等, 2006a, 2006b)。这种主碰撞汇聚成矿作用导致的成矿系统, 空间上显示自碰撞带前陆 (南) 向后陆 (北) 显示由 Au-Sn-W 稀有金属 $\rightarrow$ Cu-Au-Mo-F 矿化分带趋势。主碰撞期不仅成矿而且成大矿的理论认识, 突破长期以来束缚人们的概念, 即认为大陆碰撞过程通常导致岩石圈缩短、地壳隆升和流体排失, 因此很少伴随成矿作用 (Guild 1972), 即使成矿也主要发生于后碰撞阶段 (Crawford et al., 1992; Marignac et al., 1999; Hou et al., 2003a)。

晚碰撞转换成矿作用发生在晚碰撞阶段构造转换环境, 系由大规模走滑—剪切系统和逆冲推覆构造及幔源和壳幔混源岩浆活动和区域流体活动等主导因素诱发的成矿作用及其形成的成矿系统。在青藏高原, 构造转换背景下 (40~26 Ma) 发育的大规模走滑断裂系统、左行走滑剪切和逆冲推覆系统, 分别导致斑岩 Cu-Mo-Ag 矿和碳酸岩 REE 矿床、造山型 A 矿和热液型 Pb-Zn-Ag 矿床的形成 (侯增谦等, 2006c)。受大规模走滑断裂控制的斑岩型 Cu-Mo-Ag 成矿系统 (Hou et al., 2006a, 2007; Xu et al., 2007), 以其产出的陆内环境和含矿斑岩的非俯冲成因有别于经典的岩浆弧环境斑岩铜矿 (Hou et al., 2003b, 2005; Jiang et al., 2006)。与碳酸岩—正长岩杂岩相伴的 REE 矿床 (田世洪, 2005; 谢玉玲等, 2008), 以其产出的碰撞带环境而非裂谷环境以及岩浆碳酸岩起源于富集地幔而非地幔柱 (Hou et al., 2006a), 有别于大陆裂谷环境的 REE 矿床, 被称为造山型 REE 矿 (Wang et al., 2001a)。产于前陆盆地的 Pb-Zn-Ag-Cu 成矿系统, 以其产出的前陆环境并受大规模逆冲推覆构造系统控制, 而有别于 MVT Sedex Ireland 型或 Laisvall 型 Pb-Zn 矿 (Xue et al., 2007; He et al., 2008; 侯增谦等, 2008a), 显示碰撞带成矿的典型特征。产于红河—哀牢山剪切带的 A 矿成矿系统, 以其产出的碰撞造山环境而非增生造山环境区别于经典的造山型 A 矿 (Sun et al., 2008)。

后碰撞伸展成矿作用发生在后碰撞伸展环境, 系由平行于碰撞带的拆离构造系统和逆冲推覆构造、垂直碰撞带的正断层系统和裂谷—裂陷带以及钾质岩浆系统和淡色花岗岩等主导因素所诱发的成矿作用及其形成的成矿系统。在青藏高原后碰撞伸展阶段 (25~0 Ma), 伴随后碰撞伸展作用主要形成 4 个成矿系统, 即与新生下地壳熔融产生的 adakite 有关的斑岩型 Cu 矿成矿系统 (侯增谦等, 2001;

2004 曲晓明等, 2001; Qu et al., 2007; Hou et al., 2008 a)、与岩浆驱动热液系统有关的脉型 Sb-Au 成矿系统 (聂凤军等, 2005 杨竹森等, 2006; Yang et al., 2008 b)、与后碰撞岩浆—热液活动有关的夕卡岩型和热液脉型 Pb-Zn-Ag 成矿系统 (孟祥金等, 2007) 以及与壳内岩浆房有关的现代热泉型 Cs-Au 成矿系统 (郑绵平等, 1995 李振清等, 2006)。它们在上地壳层次受 3 大构造系统控制, 即近 NS 向正断层系统及裂谷裂陷带、EW 向展布的拆离构造带和 EW 向展布的逆冲构造带控制, 但在中下地壳/地幔层次上, 则受中下地壳物质流动—挤出过程以及俯冲大陆板片断离—拆沉过程控制 (侯增谦等, 2006 g)。成矿系统在空间上显示自南而北由 Au-Sb → Cu-Mo → Pb-Zn-Ag 矿化分带规律。

2.3.2 提出大陆型斑岩铜矿成矿新理论, 带动了找矿突破

在大陆环境, 能否形成和如何形成大型—巨型斑岩 Cu 矿, 是成矿学领域的重要理论问题, 通过系统研究青藏高原及中国东部斑岩铜矿, 发现并证实与大洋板块俯冲过程无关的 4 种大陆环境均可以产生巨型斑岩铜矿 (侯增谦等, 2007), 从而大大扩展了寻找斑岩铜矿的战略选区; 发现大陆环境的含 Cu 斑岩多为钾质埃达克岩 (adakite) (Gao et al., 2003; 侯增谦等, 2003 g), 来源于加厚的镁铁质新生下地壳 (Hou et al., 2004 侯增谦等, 2005), 地幔物质向下地壳的注入和添加以及下地壳源区角闪石分解是斑岩岩浆含 Cu 富 H₂O 高 S 高 f_{O₂} 并发生大规模成矿的根源 (Hou et al., 2008 a; 含矿岩浆的上升侵位主要受平行于碰撞带的走滑断裂系统 (Hou et al., 2003 b) 或垂直切割碰撞带的正断层系统控制 (侯增谦等, 2004; Qu et al., 2007)。浅成侵位的含矿岩浆大致在 5~8 km 深处发育大型岩浆房 (杨志明等, 2008), 在高温 (≥ 573℃)、高压条件下 (≥ 150~200 MPa), 直接出溶高温、高盐度 (44.5~58.0 wt% NaCl)、高氧逸度的成矿流体, 形成斑岩型 Cu 矿 (Yang et al., 2008 a)。由此创造性地提出了“大陆型斑岩铜矿”成矿新模型 (Hou et al., 2008 a), 突破了流行的岩浆弧环境斑岩铜矿理论, 具有重大理论意义, 受到国际同行关注。

应用该理论认识, 系统论证了冈底斯铜矿化带具有成为西藏第二条“玉龙”斑岩铜矿带的远景潜力, 解决了评价方法问题, 指明了找矿突破方向, 推动了冈底斯斑岩铜矿的找矿勘查。该世界级规模的成矿带是我国近年重大找矿突破。

2.3.3 识别出 Pb-Zn-Cu 成矿新类型, 提出碰撞造山型 Pb-Zn-Cu 新模型, 对区域矿产勘查有重要指导意义

针对大陆碰撞环境大型 Pb-Zn 矿的成矿理论问题, 系统研究了高原东北缘 Pb-Zn 成矿地质背景、矿床成因模式和构造控制模型, 创新性提出大陆碰撞产生的深层次构造滑脱、浅层次逆冲推覆和层间流体运移形成层控型 Pb-Zn 矿以及逆冲推覆—构造圈闭与地壳流体汇聚—排泄形成砂岩型 Pb-Zn 矿新认识, 由此建立了“碰撞造山型 Pb-Zn 矿”成矿新模型 (He et al., 2008; 侯增谦等, 2008 a), 区别于已有的 Pb-Zn 成矿理论模型。在理论研究基础上, 建立了碰撞造山型 Pb-Zn 矿床的勘查模型, 提出高原东北缘存在一条千余公里长的巨型贱金属成矿带。

在兰坪盆地, 对金顶 Pb-Zn 矿进行了系统研究 (Xue et al., 2004 2006 2007), 对矿区含矿岩系进行了重新厘定和矿床三维形态再塑 (修业群等, 2005), 识别了金顶矿区 3 种角砾岩: 构造角砾岩、膏溶角砾岩和侵位角砾岩 (王安建等, 2007)。侵位角砾岩被富含铅锌的氧化矿胶结, 与膏溶角砾岩呈侵位关系, 显示一种低温、高压的含矿泥浆的侵位特征, 反映了古盐丘的发育, 并为 Pb-Zn 矿工业堆积提供重要空间 (高兰等, 2005); 发现了 3 种沥青: 软沥青、脆沥青和稠状油质沥青, 或出现于灰岩型氧化矿体中, 沿不规则裂隙分布, 或在黑色灰岩岩块的空洞、裂隙中与天青石密切共生。沥青为热降解沥青, 是油藏遭到破坏的残余物, 反映矿区可能出现过油藏 (王安建等, 2007)。稳定同位素分析和研究证明, 大规模成矿的流体以盆地流体为主, 成矿物质主要来自上地壳层次的火山—沉积岩系, 部分矿床显示少量幔源物质贡献 (Xue et al., 2004 2007)。硫为硫酸盐 (热化学、或有机物质、或细菌) 还原成因, 各成矿阶段硫同位素没有达到平衡。在综合研究基础上, 首次提出了初步提出金顶超大型铅锌矿床的新成因模型, 强调了碰撞造山与逆冲推覆构造形成容矿空间, 古盐丘和古油藏发育为成矿提供流体和金属储聚空间, 以及盐丘—油藏封闭层破坏和金属淀形成矿 (王安建等, 2007)。从流体包裹体和盆地流体模拟两个方面对金顶大规模成矿流体动力学过程提出了新认识, 初步证实超压成矿流体系统的存在和壳幔流体混合成矿机制 (Chi et al., 2006 2007; Xue et al., 2006)。

2.3.4 初步建立了若干矿床的成矿新模型, 系统揭示了大陆碰撞带成矿机理

(1) 提出了碰撞造山带 Au 矿成矿新模型: 造山型金矿是增生造山带最重要的一种 Au 矿类型 (Kerrich et al., 1990; Groves et al., 1998), 其能否产出于碰撞造山带? 碰撞造山带 Au 矿的成矿机制如何? 尚存在很大争议 (Barley et al., 1992)。我们通过对哀牢山 Au 矿带的系统研究, 不仅证明碰撞造山带可以产出大型造山型金矿, 而且提出了碰撞造山型 Au 矿成矿新模型 (Sun et al., 2008)。研究表明, 哀牢山 Au 矿带不是产于造山带的增生楔内, 而是产于碰撞带的大规模走滑剪切带—红河剪切带 (Red River Shear Zone, 即扬子地块的构造边界的超岩石圈断裂带上。该剪切带早期左行走滑, 晚期右行 (Tapponnier et al., 1990)。沿走滑断裂分布的富碱侵入岩及煌斑岩年龄 (42~37 Ma) 表明左行走滑起始于 40 Ma 前后, 而金矿带多数矿床的热液蚀变年龄 (38~35 Ma) (Sun et al., 2008) 证明, 成矿作用伴随碰撞造山晚期的大规模走滑活动而发生。哀牢山 Au 矿带多数矿床就位于红河剪切带的二级或次级构造上, 后者多为高角度反转断裂系统和逆冲推覆剪切带, 脆性与韧性变形的转换部位常控制矿体的空间定位。金矿体主要为含金石英脉和含金构造蚀变岩, 赋矿岩石多数为古生代蛇绿混杂岩系, 显示绿片岩相和角闪岩相变质, 产于上地壳中深环境 (多数 > 10 km)。相比于典型造山型金矿, 碰撞造山带金矿矿石矿物组合复杂, 为自然金 + 贱金属硫化物 + 菱铁矿等, 常见白钨矿, 相应的矿化元素组合也较为复杂, 出现 Au + N 组合和 Au + W + Cu + Pb + Zn 等组合; 含金石英和白钨矿流体包裹体中 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 组成绝大多数为 $-2\text{‰} \sim -6\text{‰}$, 显示其中 CO_2 可能主要来自幔源 (熊德信等, 2006)。微量元素和同位素地球化学研究显示金矿石中有较多深源 (下地壳和上地幔) 物质参与成矿, 垂直方向物质交换强烈 (熊德信等, 2006; Sun et al., 2008)。流体包裹体 H-O 同位素测定显示该类矿成矿流体主要由变质流体组成, 但有幔源物质加入。成矿流体为近临界的高 CO_2 ($\text{CO}_2 \geq \text{H}_2\text{O}$) 的中低盐度的 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$ 体系流体, 在成矿过程中基本不存在流体混合, 减压沸腾导致了 Au 的快速沉淀。

(2) 提出了造山型 REE 矿床成矿新模型: 过去通常认为, 世界范围的原生 REE 矿床主要形成于大陆裂谷环境。我们通过对冕宁—德昌 REE 成矿带系统研究, 证明 REE 成矿作用与喜马拉雅期碳酸岩—碱性杂岩体有关, 含矿岩体和 REE 矿床均形成于喜马拉雅期, 年龄介于 40~10 Ma (田世洪等,

2008a, 2008b)。碳酸岩—碱性杂岩带受印度—亚洲大陆碰撞带的一系列新生代走滑断裂系统控制, 矿床产于大陆碰撞带环境而非裂谷环境 (侯增谦等, 2008b)。碳酸岩与碱性正长岩时空密切共生, 微量元素分布模式及 Sr-Nd 和 C-O 同位素组成类似, 表明两者为岩浆不混溶产物 (刘丛强等, 2004)。岩浆碳酸岩高度富集大离子亲石元素 (Sr, Ba 和轻稀土元素, 相对亏损高场强元素 (Nb, Ta, Zr, Hf, Ti), 其 Sr-Nd-Pb 同位素和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 组成证明其来源于地壳物质深循环而成的富集型地幔岩石圈 (Hou et al., 2006b)。熔—流体包裹体观察和脉石矿物 $\delta^{18}\text{O}-\delta^{13}\text{C}$ 组成证据证明, 成矿流体来自不混溶的岩浆系统 (侯增谦等, 2008b), 大规模走滑断裂及其派生的拉分构造和张性裂隙带促使了含 REE 的岩浆热液系统的形成。再塑了成矿流体形成演化过程和 P-T-X 演化轨迹 (Xie et al., 2008), 提出初始碳酸岩流体为高温、高压、高溶解能力的超临界流体, 具有富 K, Na, S, CO_2 和 Sr, Ba, REE 等多种成矿元素的多元流体体系特征。随温度、压力下降演化为中—高温、高盐度流体。稀土矿化发生在岩浆—热液转化期到热液期, 成矿温度主要集中在 275~325°C (谢玉玲等, 2008; Xie et al., 2008)。通过对典型矿床精细研究和综合对比, 提出了 REE 成矿作用成因模式 (Hou et al., 2008b)。模式强调, 成矿热液流体系统在时间上经历了一个复杂的演化过程, 从不混溶碳酸岩—正长岩岩浆系统分离出高温含硫酸盐的 NaCl-KCl 的卤水, 到流体沸腾导致 REE—氟碳酸盐和硫酸盐有效沉淀, 最后与雨水混合导致少量硫化物沉积; 在空间上形成了一个“三层楼模式”的 REE 成矿系统 (侯增谦等, 2008b)。其中, 深部层位形成细脉—浸染状矿体 (如里庄式矿床), 中部层位形成脉状矿体 (如牦牛坪式矿床), 而上部层位形成角砾岩筒矿体 (如大陆槽式矿床)。

(3) 提出了藏南拆离系 Sb-Au 成矿新认识: 藏南拆离系是青藏高原碰撞造山带内一个十分独特的构造系统, 在此构造环境能否发生和如何发生成矿作用是一个鲜为人知的科学问题。通过对藏南拆离系及其成矿作用研究, 查明藏南拆离系主要产出 Au, Sb-Au 和 Sb 矿床, 研究提出 Sb-Au 矿化多为浅成低温热液型, 受两大构造系和浅成侵位岩体控制 (聂凤军等, 2005; 杨竹森等, 2006)。一是 EW 向展布的拆离断层系, 主要控制了 Sb 矿带分布, 可能提供了成矿流体大规模迁移—集聚的通道, 二是 NS 向正断层系统, 几乎控制了所有 Sb 和 Sb-Au 矿的空

间展布,为成矿提供了重要的扩容空间和就位部位(侯增谦等, 2006)。控矿岩体主要为变质核杂岩中心的淡色花岗岩及其派生的斑岩体,前者可能提供了流体活动的热机,因此出现围绕热穹隆的金属矿化分带,中心带为 Au矿化,外围为 Sb或 Sb-Au矿化;后者直接形成了斑岩型或与碱性斑岩有关的浅成低温 Au矿化。基于构造和成矿关系研究,初步提出了藏南拆离系 Sb-Au成矿构造控制模型(杨竹森等, 2006; Yang et al., 2008)。

通过对西藏热泉型矿床(点)空间分布与成因关联的深入研究,初步提出了热泉型矿床和矿化在空间上具有垂向分带性,自地表向下依次为:热泉型铍矿、硫磺矿和自然硫→高岭土化带→热泉型锑矿→热泉型金矿。

(4) 提出了碰撞带 Sn叠加成矿新机制:在世界范围的大陆碰撞带或碰撞造山带,常常发育与花岗岩有关的 Sn矿(Mitchell et al., 1981)。然而,这些 Sn矿通常是云英岩型的,主要产于后碰撞阶段(Selmann et al., 1994)。在大陆汇聚碰撞阶段(主碰撞期)能否形成大型 Sn矿?形成什么类型的 Sn矿,是一个重要的理论问题。我们系统研究了产于大陆碰撞带环境的腾冲新生代花岗岩及来利山大型 Sn矿。发现含矿花岗岩体为多期侵位的复式岩体,峰期年龄集中于 66~58 Ma, 54~50 Ma和 45~41 Ma(董方洲等, 2006),形成于主碰撞汇聚环境。其中,二长和钾长花岗岩伴生 Sn矿化,含白云母花岗岩伴生稀有金属矿化。岩石地球化学和 SrNd同位素组成表明,两者分别来源于地壳砂质原岩和泥质原岩的部分熔融,其形成与大陆碰撞引起的地壳加厚和地壳深熔过程有关(侯增谦等, 2006)。这些花岗岩浆的地壳起源决定了岩浆具有容载壳源金属元素(W, Sn稀有)的巨大潜力。然而,我们研究发现,与花岗岩有关的 Sn矿(如来利山锡矿),多数矿体远离岩体分布,显示一定的层控特征,矿石类型以锡石-块状硫化物为主体,大量产出胶黄铁矿,矿石显示条纹-条带状构造,流体包裹体显示双峰式温度分布,SPb同位素组成显示分组特征等,据此提出,喜山期岩浆-热液系统对海西期喷流沉积(SEDEX)流体系统的复合叠加可能是形成大型 Sn矿的主导因素(侯增谦等, 2006)。海西期喷流沉积流体系统形成的大量块状硫化物在全区 D/C界面的广泛分布,证实了这种叠合成矿作用。

2.4 成矿规律与成矿预测取得重要成果

2.4.1 初步查明了主碰撞带矿产分布规律,划分了主要成矿单元,并预测了战略新区

在 973 专题研究成果和地调成果基础上,通过区域成矿学研究,初步查明主碰撞带矿产分布特点,初步划分了成矿单元,在空间上划分出三大成矿省以及 11 个 II 级或 IV 级成矿带,成矿省包括主碰撞带后陆羌塘-三江叠加成矿省、冈底斯-念青唐古拉主碰撞带成矿省和喜马拉雅三个成矿省, III 级成矿带 5 个, IV 级成矿带 6 个,为区域潜力评价和预测奠定了基础。以 MAPGIS 为平台,开展全区 1:150 万地质矿产数据库建库工作,编制了开展成矿预测的主碰撞带 1:150 万比例尺的系列综合性基础图件,如青藏高原 1:150 万地质矿产分布图;青藏高原 1:150 构造单元划分图;青藏高原 1:150 万综合成矿信息图。根据预测评价矿种成矿模型和结合综合编图成果,在主碰撞带划分出 6 个 A 类成矿远景区、13 个 B 类成矿远景区和 5 个 C 类成矿远景区,初步圈出铜、铅锌、锑金以及富铁矿的矿化集中区 12 个。这些成果为青藏高原专项工作部署提供了重要依据,为区域矿产资源潜力评价与战略新区预测奠定了指导。

2.4.2 提出了极低工作程度区(大陆碰撞带)成矿预测新思路和新方法

在深入探索西藏高原的成矿预测思路问题,郑有业等总结提出了极低工作程度区快速逼近找矿目标的“协优”成矿预测新方法,解决了制约找矿突破的瓶颈问题,为冈底斯的找矿突破提供了思路方法支撑。以往在进行成矿预测时,通常从地、物、化、遥等方面入手,选取了数十、甚至上百个信息(变量)进行研究、计算、分析,力求不漏掉任何信息。然而,在野外地质工作难度大、工作程度极低,找矿信息很少、且获取极其困难的情况下,选定多少变量信息可以实现快速缩小找矿靶区和科学成矿预测,是摆在我们面前的严峻课题。我们基于系统性、关联性、目标一致性、不充足判据的充足化、复杂与精确的反比性原则,提出了快速逼近找矿目标的定位预测概念模型——“协优”成矿预测法。“协”是指相互作用和内在联系;“优”是指最优(关键)和优化(选优),最优的信息必然是少量的。其基本思想是只要优选出少量相互关联、目标一致、最能揭示某种类型成矿本质特征的关键信息组合,就可能导致该类型矿床被发现。而不用去提取大量相互联系并不紧密、目标并不一致、成矿意义不明确的信息。其要点是强调直接信息的先导作用及少数相互关联信息的明确指

示意义, 突出信息与预测目标的一致性。这样可有效减少信息的不确定性和多解性, 从而降低找矿风险。而对一个地区地质特征、成矿背景、成矿环境的熟悉程度, 即能否赋予各种信息以客观的地质内涵就成为该方法预测成败的关键。

在该思路方法的指导下, 通过运用非线性信息提取技术以及化探信息的衬值累加、分背景处理技术等, 将冈底斯的地质、地球化学、遥感异常从背景中分离出来, 特别是通过赋予不同信息以客观的地质内涵, 来识别和提取低缓、微弱及隐蔽信息, 强化矿致异常, 使冈底斯矿带有找矿意义的“低缓、无”异常明显凸现出规律性, 据此圈定了一批找矿靶区, 并发现了一批矿床。

2.4.3 初步评价了青藏高原第三条斑岩铜矿带—班—怒斑岩铜矿带的成矿远景

系统研究了青藏高原第三条斑岩铜矿带—班—怒斑岩铜矿带的地质背景、含矿斑岩、蚀变组合、矿化特征和成矿机理, 初步评价了其成矿远景, 取得重要研究进展。班—怒缝合带可能是由多条洋内俯冲带复合而成, 以幕式侵入为特点的中酸性岩体沿班—怒缝合带呈东西向带状分布, 西段已发现两个大型斑岩铜矿和众多矿点, 一条新的斑岩铜矿带的雏形已基本形成。含矿岩体 SHRMP 年龄介于 112 ~ 128 Ma (曲晓明等, 2006), 主要岩相为花岗闪长斑岩, 高 K 钙碱性, 富集 LILE (Rb, K, Sr, Pb), 亏损 HFSE (Nb, Ta, Ti), 显示岛弧岩浆特征, 地球化学上也显示 Adakite 亲和性 (曲晓明等, 2006; 李金祥等, 2008)。含矿斑岩显示典型的斑岩型铜矿蚀变分带模式和矿化特征, 脉石发育三个大类和十个亚类的流体包裹体, 反映成矿流体是一种来自超热岩浆的高温、高盐度、高度氧化的含大量磁铁矿的岩浆流体 (余宏全等, 2006; 李光明等, 2007), 堪与世界级巨型富金斑岩铜矿 (印尼 Grasberg、菲尼宾 Dizon、智利 Zaldívar、阿根廷 Bajo de la Alumbrera) 相比较, 预示班—怒带具有形成世界级富金斑岩铜矿的潜力。

2.4.4 提出并确立西藏冈底斯带北侧存在一条新的 Pb-Zn-Ag 矿化带

在冈底斯北侧发育一条新的大型 Pb-Zn-Ag 矿化带, 东起南木林, 西抵错勤, 可能继续向西延伸, 目前已发现 Ag-Pb-Zn 矿床、矿点和矿化点几十处, 总长数百公里, 具有较大的成矿远景, 有望成为继斑岩铜矿带之后的又一条具有巨大经济意义的银多金属成矿带 (孟祥金等, 2007)。Pb-Zn-Ag 多金属矿化带位于冈底斯花岗岩基北侧, 在空间上严格受近 EW

向展布的措勤—旁多逆冲带控制, 矿田和矿床受 EW 向逆冲断裂带与 NS 向正断层交汇部位控制。前者提供了流体大规模迁移—汇聚的通道, 后者提供了流体积聚和矿质沉淀的扩容空间 (孟祥金等, 2007)。矿化类型以热液脉型 Ag-Pb-Zn 为主, 部分表现为矽卡岩—热液脉型特点 (余宏全等, 2005)。值得注意的是, 该带也大量发育多期成矿作用叠加而成的大型铅锌银矿床 (如亚贵拉、蒙亚啊等矿床)。这条 Pb-Zn-Ag 矿化带的明确确立, 为在冈底斯西段寻找大型富 Pb-Zn-Ag 矿指明了找矿方向。

2.4.5 提出冈底斯成矿带东段具有寻找独立的斑岩型钼矿床的较大潜力

潘桂棠、李光明课题组通过冈底斯成矿带东段斑岩系统与矿化的系统分析, 提出该区具有寻找独立的斑岩型钼矿床的较大潜力。主要表现在冈底斯北带亚贵拉铅锌银矿区、沙让矿区均发现有较好的独立型的斑岩型钼矿化, 矿化与石英二长花岗斑岩 (脉) 有关, Re-Os 成矿年龄为 49.4 Ma (唐菊兴, 未刊资料), 相当于主碰撞汇聚成矿期。此外, 冈底斯南部的汤不拉、得明顶等地区也发现有以钼为主的斑岩矿化。汤不拉矿区含矿岩体为似斑状黑云二长花岗岩与石英斑岩, 矿石矿物主要为辉钼矿和黄铜矿等, Mo 平均品位 0.17%, 仅个别矿段 Cu 达到边界品位, 表现出以钼矿化为主, 贫铜的特点。尽管目前的研究还是初步的, 但就其地质背景和成矿环境而言, 冈底斯东段的斑岩型 Mo 矿很可能与秦岭碰撞造山带的大型钼矿带是可以类比的。这一认识的提出, 对在冈底斯东段突破斑岩型钼矿具有重要的指导意义。

2.4.6 提出沿雅鲁藏布江缝合带存在一条富有远景的造山型 Au 矿化带

我们已经从理论上证明, 碰撞造山带具有形成大型造山型 Au 矿的可能, 雅鲁藏布江缝合带及其两侧断裂系统, 具有造山型 Au 矿所要求的断裂系统长期活动、规模大、切割深、构造网络连通性好特征, 具有发育造山型金矿的优越环境 (侯增谦等, 2006b)。沿雅鲁藏布江缝合带不同地段发育不同的构造系统。在西段, 缝合带南侧发育赋矿的变质岩系和韧性剪切带, 控制马攸木等 Au 矿 (江思宏等, 2008); 中段 (谢通门—沃卡) 发育长达 500 km 的韧性剪切带, 其北侧次级脆性断裂或 NNW 向斜列的脆性断裂, 控制了仁钦则、莫多拉、谢通门等众多金矿或金铜矿分布; 在东段, 其南侧派生的脆性断裂也有金矿发育。这些矿床和矿化严格受断裂控

制,就位于韧—脆性转换部位,呈板状脉体、构造蚀变岩或破碎角砾岩产出。相应蚀变包括黄铁绢英岩化、硅化、绿泥石化和碳酸盐化。该创新认识的提出,为在青藏高原原突破造山型 Au 或 $CuAu$ 矿床提供了重要的理论指导。

2.4.7 提出昌都盆地内部发育逆冲推覆构造控制的铅锌多金属矿带

系统研究了昌都盆地的构造演化,确定昌都盆地形成于喜马拉雅期的表皮构造是主要的控矿构造(唐菊兴等, 2006)。提出盆地西侧的类乌齐—左贡成矿带的北段干中雄—宾达—南越拉铅锌多金属矿带、盆地东侧的江达成矿带的丁钦弄银铜多金属矿带是昌都盆地有望发现大型和超大型铅锌多金属矿的成矿带。其中与推覆构造有关的铅锌多金矿有望取得突破,在都日—优日一带的找矿潜力十分巨大。上述战略靶区已经列入青藏专项。

2.5 探索出一条科研带动勘查突破、勘查提升理论认识的新路

项目组成员高度重视成果转化工作,努力探索科研—勘查密切结合、良性互动、相互促进的新机制。在项目实施过程中,项目组成员通过先导性的科研工作和初步的成矿预测,提出一大批找矿靶区,引导企业登记矿权,并注入大量勘查资金;在登记片区,项目组成员一方面理论结合实践主持矿产勘查,并带动找矿突破,一方面,通过勘查的突破,深化理论研究,验证理论认识,走出了一条科研带动勘查突破、勘查提升理论认识的新路子。

2.5.1 主持冈底斯北带洞日松多靶区预查,发现大中型规模的 $Pb-Zn-Ag$ 矿

在识别和确立冈底斯北缘发育一条与斑岩铜矿带呈对产出的 $Pb-Zn-Ag$ 矿化带基础上,圈定了若干银多金属找矿靶区(孟祥金等, 2007)。其中,在洞日松多靶区,课题组孟祥金博士主持了企业设置的矿产预查项目。完成了大比例尺地质填图基础上,发现银多金属矿化受交汇构造和隐爆角砾岩筒控制。组织实施了地球物理探测和山地工程,圈定了银多金属矿体,并发现了新的矿化异常。经钻探工程控制,获 $334+333$ 铅锌金属资源量 45×10^4 t, 达中型规模,显示大型远景。这一找矿发现与研究,证实了冈底斯北缘 $Pb-Zn-Ag$ 矿化带的存在,深化了晚碰撞伸展成矿作用理论认识。

2.5.2 主持冈底斯西段加多捕勒靶区预查,发现具有大中型远景的 $Cu-Fe$ 矿床

杨竹森课题组根据主碰撞汇聚成矿新认识,重

点对冈底斯中段众多主碰撞期黑云母花岗岩和似斑状花岗闪长岩 ($51 \sim 43$ Ma) 及其成矿潜力进行了研究,在恰功矽卡岩型铁矿床外围圈定了新的找矿远景区。通过遥感蚀变信息提取和地表查证,发现加多捕勒、江嘎、康弄坡南和康弄坡北 4 个矽卡岩型矿化区,其中在加多捕勒和江嘎地表发现铁铜矿化。在此基础上,主持了加多捕勒铁铜矿区的地质预查,完成 1:10000 地质草测 56.73 km², 1:5000 地质草测 5 km², 槽探 1260 m²、浅井 30×10 m, 地表控制 2 条铁、铜矿体,铁矿体长约 800 m, 平均厚度约 4.0 m, 平均品位 TFe 48.1% , 资源量 (334_1) 铁 61.5×10^4 t, 铜矿体长约 500 m, 平均厚度约 20.0 m, 平均品位 Cu 6.24% , 资源量 (334_1) 铜 18.7×10^4 t。现有资料显示矿床可达大型规模。研究表明,恰功大型 Fe 矿和加多捕勒 $Fe-Cu$ 矿床均属矽卡岩型矿床。导致矽卡岩型矿化的岩体均为喜山粗粒黑云母花岗岩和似斑状花岗闪长岩, $SHRMP$ 年龄介于 $56 \sim 51$ Ma, 进一步证实主碰撞期不仅可以成矿,而且可以成大矿。

2.5.3 主持冈底斯带西段 $Cu-Au$ 远景区评价,发现具大型远景的则莫多拉铜—金矿床

在继雄村大型 $Cu-Au$ 矿突破后,唐菊兴课题组承担了其外围区的评价研究,进行了地质背景研究、成矿条件分析,1:1万土壤地球化学测量和激电测量,发现了具有大型远景的则莫多拉铜—金矿床。现已圈定了 3 个主矿体。I₁ 号矿体受控于 NWW 向构造破碎带,矿化较连续,矿体长大于 600 m, 金矿体平均厚 44.3 m, 铜矿体平均厚 43.5 m, 平均品位分别为 4.59 g/t 和 0.557% , 估算金、铜资源量分别为 107.24 t 和 12.78×10^4 t。II₂ 金矿体平均厚 13.5 m, 铜矿体平均厚 26.7 m, 平均品位分别为 2.17 g/t 和 0.74% , 估算金、铜资源量分别为 15.45 t 和 10.42×10^4 t。I₃ 号主矿体受控于大理岩与安山岩的接触带构造,矿化较连续,矿体长大于 900 m, 其中铜金矿体延长 400 m, 铜矿体达 900 m, 金矿体平均厚 5.0 m, 铜矿体平均厚 16.0 m, 平均品位分别为 2.71 g/t 和 1.53% , 估算金、铜资源量分别为 3.18 t 和 29.05×10^4 t。

2.5.4 主持冈底斯东段弄如日靶区的地质预查,发现弄如日中型 Au 矿

李光明等 (2005) 在冈底斯东段发现弄如日 Au 矿基础上,主持了企业委托的矿产预查工作,深入研究了其成矿条件成矿期次和资源潜力,提出其为具有 $Au-Sb-A$ 组合的浅成低温热液型矿床。通过大

比例尺地质填图 (1: 5000 和 1: 1000)、钻探、平硐、探槽以及土壤化探等工作, 在矿区控制 (333+334) 金资源量 11 t, 达中型矿床规模。这些勘查突破进一步深化了碰撞造山成矿理论认识。

总之, 5 年来, 在 973 课题组全体同仁的工作努力下, 圆满地完成了项目设计的各项任务和目标, 取得了大批创新性成果。这些成果部分在国际国内重要学术刊物发表, 部分在国际相关学术会议上宣读, 引起强烈关注, 得到国内外同行的高度评价, 特别是在大陆碰撞造山成矿理论等方面取得的突破性进展, 被专家认为在国际地学界占居了一席之地, 做出了中国学者的重要贡献。

3 展望与建议

我国矿产资源领域科学研究面临两大基本现实: ①经典板块构造成矿理论体系的不完备性和难适应性, ②中国大陆成矿作用的独特性和复杂性。这两大现实既是严峻挑战, 更是创新机遇。发挥中国大陆地质优势, 孕育和创立大陆成矿理论体系, 既是我国矿产资源领域的重大需求, 也将为国际地球科学发展作出重要贡献。

中国被公认为是开展大陆成矿研究的最佳场所。中国地质构造复杂、演化历史漫长, 不仅记录了微陆块—小洋盆型古板块演化旋回的完整历史, 也叠加了中生代太平洋板块俯冲、印度板块碰撞导致的大陆边缘及内部强烈变形复杂动力学过程的信息。正在造山的青藏高原、独具特色的陆内造山带、大陆物质俯冲—折返的超高压变质带、遭受破坏与改造的古老克拉通、以增生造山为特色的古亚洲成矿域、以碰撞造山为特色的特提斯—喜马拉雅成矿域, 以及以岩石圈裂解减薄为特色的巨型陆内成矿省, 均发育在中国境内, 为大陆成矿作用研究提供了得天独厚的天然实验室。立足于全球构造的视野, 充分发挥中国大陆地域优势, 将会在碰撞造山成矿理论以及陆内活化成矿理论研究方面, 取得突破性成果, 将为孕育和建立大陆成矿理论体系作出实质性贡献。

将成矿作用放在大陆系统演变过程的框架内, 揭示成矿作用与超大陆的裂解、增生、碰撞、陆内演化及其动力学过程的耦合关系和成因链接, 更深刻地理解矿产资源的形成和赋存规律, 已成为当今国际成矿学研究的主流。相信通过对大陆形成演化各阶段过程与成矿作用研究的不断深化, 特别是通过

全球科学家的合作研究, 有望建立起超越经典板块构造成矿理论的超大陆旋回与成矿理论体系。

围绕构建大陆成矿理论体系, 发展成矿预测学理论与方法体系这一重大目标, 建议我国未来 15 年重点进行下列研究:

大陆裂解与成矿作用: 集中在两个大的关键问题上: ①克拉通破坏与成矿, 了解古老大陆克拉通的根部结构与新老地幔置换, 特别是地壳—地幔物质与能量交换的方式、途径及其对成矿作用的制约; ②重点研究地幔柱与成矿系统, 特别是峨眉山—地幔柱活动形成的大火成岩省—岩浆系统与成矿多样性, 揭示地幔柱成矿作用机制。

大陆聚合过程与成矿耦合: 集中在两个大的关键问题上: ①继续开展最具特色的青藏高原及周缘的碰撞造山与成矿作用研究, 系统揭示不同碰撞造山阶段、不同碰撞环境下发育的主要成矿系统特征、成矿作用类型及其成矿作用机制, 深化和完善大陆碰撞带成矿理论; ②深入研究中国北方造山带, 系统揭示增生造山带时空结构、汇聚过程及成矿耦合, 查明增生造山过程形成的成矿环境和关键地质作用对成矿作用的控制, 揭示增生造山与碰撞造山叠加转换与成矿作用类型和叠合成矿机制。

陆内变形与成矿作用: 集中于中国东部地区, 重点开展 3 个关键问题研究: ①陆内地壳精细结构与成矿系统研究, 采用新技术, “透明”显示大型矿集区浅部地壳三维精细结构, 厘定浅部地壳多层构造—岩浆架构与控矿构造模式、赋矿建造三维结构形态与空间分布趋势、浅部地壳热流输导系统与深部矿床就位空间, 揭示深部结构和深部过程控制其对大型矿集区的空间边界和三维网络的控制作用, 揭示大型矿集区成矿系统结构、类型、叠合与成矿机制; ②开展陆内变形过程与成矿制约研究, 揭示陆内变形方式、类型、过程、机制及其对成矿作用的控制; ③研究陆内构造—岩浆活化与成矿响应, 特别是陆内构造转换、岩浆作用过程及其成矿响应。

大陆生长过程、壳幔作用与成矿耦合: 重点集中于 3 个重要方面: ①大陆生长过程与成矿作用, 揭示大陆生长方式、生长过程、生长机制及其对成矿作用的约束和贡献; ②大陆物质循环与成矿问题, 了解大陆物质俯冲—折返以及深俯冲—深循环过程对成矿物质和成矿流体 (含岩浆) 活化、循环、汇聚等制约; ③壳—幔相互作用与成矿约束, 揭示岩浆底侵作用、拆沉作用等过程引起的壳—幔相互作用及其对成矿物质聚散行为的控制作用。

大陆环境成矿新模型研究: 中国大陆独特的构造位置和多旋回式演化, 决定了许多矿床显示大陆成矿特色和叠加复合特征, 难以用已有的成矿模型来解释, 特别是中国境内发育完好的西部大陆碰撞带和东部陆内区产出许多特色的矿床类型, 需要建立新的成矿模型。这些模型包括与大洋板块俯冲无关的斑岩 Cu 矿、受前陆区逆冲推覆构造系统控制的 Pb-Zn-Ag 矿床、与陆内花岗岩有关的 W-Sn-Mo-B 矿床、碰撞带产出的 REE 和 Au 矿床等等。

致谢 本文是 973 项目的初步总结性成果, 是参与项目研究的全体科研人员的集体劳动结晶。因时间关系和篇幅限制, 项目组成员的大量科研成果未能充分反映, 参考文献也未能一一列出。项目研究过程中, 专家组成员翟裕生院士、钟大赉院士、滕吉文院士、郑绵平院士以及科技部联系专家李廷栋院士、丁国瑜院士、许东禹研究员、赵振华研究员、马福臣研究员和顾连兴教授的悉心指导, 使得项目按整体科学目标顺利实施。莫宣学教授、潘桂棠研究员、王安建研究员和吕庆田研究员等项目专家组成员以及 973 项目全体同仁的通力合作、密切协作和共同努力, 使得项目按预定目标整体推进, 取得了整装性创新研究成果。特别感谢科技部基础司、973 管理办公室、国土资源部科技司、中科院资环局以及中国地质科学院资源所和地质所等单位的各位领导和同仁的亲切关怀、正确领导和大力支持。

参考文献

- 陈建林, 许继峰, 康志强, 王保弟. 2006 青藏高原西部措勤县地区中新世布嘎寺组钾质火山岩成因 [J]. 岩石学报, 22(3): 585~594.
- 陈建林, 许继峰, 康志强, 王保弟. 2007 青藏高原西南部查孜地区中新世钾质火山岩地球化学研究及其成因 [J]. 地球化学, 36(5): 437~447.
- 陈衍景, 陈华勇, 刘玉林, 郭光军, 赖勇, 秦善, 黄宝玲, 张增杰, 隋颖慧, 李超, 李震, 李萍, 李欣, 王海华, 朱梅湘, 高秀丽, 魏倚英. 1999 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, 44: 1681~1689.
- 丁林, 岳雅慧, 蔡福龙, 徐晓霞, 李清海, 来庆洲. 2006 西藏拉萨地块镁质钾质火山岩即对南北向裂谷形成时间和切割深度的制约 [J]. 地质学报, 80: 1252~1261.
- 董国臣, 莫宣学, 赵志丹, 朱第成, 宋涛, 王磊. 2008 西藏冈底斯南带辉长岩及其所反映的壳幔作用信息 [J]. 岩石学报, 24(3): 203~210.
- 董方浏, 侯增谦, 高永丰, 曾普胜, 蒋成兴. 2006 滇西腾冲新生代花岗岩: 成因类型与构造应用 [J]. 岩石学报, 22(4): 927~937.
- 高兰, 王安建, 刘俊来, 修群业, 曹殿华, 翟云峰. 2005 兰坪金顶超大型矿床研究新进展: 侵入角砾岩的发现及其地质意义 [J].

- 矿床地质, 24(4): 457~461.
- 高永丰, 侯增谦, 魏瑞华, 孟祥金, 胡华斌. 2006 冈底斯带始新世基性次火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素特征: 碰撞后岩浆地幔源区约束 [J]. 岩石学报, 22(3): 547~557.
- 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 [J]. 中国地质, 28: 27~29.
- 侯增谦, 吕庆田, 王安建, 李晓波, 王宗起, 王二七. 2003^a 试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, 22: 319~334.
- 侯增谦, 曲晓明, 王淑贤, 高永丰, 杜安道, 黄卫. 2003^b 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), 33: 609~618.
- 侯增谦, 莫宣学, 高永丰, 曲晓明, 孟祥金. 2003^c 埃达克岩 (Adakite): 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, 21: 1~12.
- 侯增谦, 高永丰, 孟祥金, 曲晓明, 黄卫. 2004 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 [J]. 岩石学报, 20: 239~248.
- 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: 源岩相变及深部约束过程 [J]. 矿床地质, 24(2): 108~121.
- 侯增谦, 莫宣学, 高永丰, 杨志明, 董国臣, 丁林. 2006^a 印度大陆与亚洲大陆早期碰撞过程与动力学模型: 来自西藏冈底斯新生代火成岩证据 [J]. 地质学报, 80(9): 1233~1248.
- 侯增谦, 赵志丹, 高永丰, 杨志明, 江万. 2006^b 印度大陆板片前缘撕裂与分段俯冲: 来自冈底斯新生代火山—岩浆作用证据 [J]. 岩石学报, 22(4): 761~774.
- 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. 2006^c 青藏高原碰撞造山带: I 主碰撞造山成矿作用 [J]. 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. 2006^d 青藏高原碰撞造山带: II 晚碰撞转换成矿作用 [J]. 矿床地质, 25(5): 521~533.
- 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. 2006^e 青藏高原碰撞造山带: III 后碰撞伸展成矿作用 [J]. 矿床地质, 25(6): 629~651.
- 侯增谦, 潘小菲, 杨志明, 曲晓明. 2007 论大陆环境斑岩铜矿 [J]. 现代地质, 21(2): 332~351.
- 侯增谦, 宋玉财, 李政, 王召林, 杨志明, 杨竹森, 刘英超, 田世洪, 何龙清, 陈开旭. 2008^a 青藏高原碰撞造山带 Pb-Zn-Ag 矿床新类型: 成矿基本特征与构造控矿模型 [J]. 矿床地质, 27: 123~144.
- 侯增谦, 田世洪, 谢玉玲, 袁忠信, 杨竹森, 杨志明, 尹淑苹, 费红彩, 邹天人, 李小渝. 2008^b 川西冕宁—德昌喜马拉雅期稀土成矿带: 矿床地质特征与区域成矿模型 [J]. 矿床地质, 27: 145~176.
- 江思宏, 聂凤军, 刘翼飞. 2008 西藏马攸木金矿床的矿床类型讨论 [J]. 矿床地质, 27: 220~229.
- 李光明, 刘波, 余宏全, 丰成友, 屈文俊. 2006^a 西藏冈底斯成矿带南缘喜马拉雅早期成矿作用—来自冲木达铜金矿床的 Re-Os 同位素年龄证据 [J]. 地质通报, 25(12): 1481~1486.

李光明, 秦克章, 丁奎首, 李金祥, 王少怀, 江善元, 林金灯, 江化寨, 方树元, 张兴春. 2006b 冈底斯东段南部第三纪夕卡岩型 Cu-Au-Mo 矿床地质特征、矿物组合及其深部找矿意义 [J]. 地质学报, 80: 1407~1421.

李光明, 李金祥, 秦克章, 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高氧化成矿流体: 流体包裹体证据 [J]. 岩石学报, 23: 935~952

李金祥, 李光明, 秦克章, 肖波. 2008 班公湖带多不杂富金斑岩铜矿床斑岩—火山岩的地球化学特征与时代: 对构造背景的制约 [J]. 岩石学报, 24: 531~543

李振清, 侯增谦, 聂凤军, 杨竹森, 曲晓明, 孟祥金, 赵元艺. 2006 西藏地热活动中铯的富集过程探讨 [J]. 地质学报, 80: 1457~1464.

刘从强, 黄智龙, 许成, 张鸿翔, 苏根利, 李和平, 漆亮. 2004 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, 1~229

刘俊来, 宋志杰, 曹淑云, 翟云峰, 王安建, 高兰, 修群业, 曹殿华. 2006 印度—欧亚侧向碰撞带构造—岩浆演化的动力学背景与过程—以藏东三江地区构造演化为例 [J]. 岩石学报, 22(4): 775~786

孟祥金, 侯增谦, 叶培盛, 杨竹森, 李振清, 高永丰. 2007 西藏冈底斯银多金属矿化带的基本特征与成矿远景分析 [J]. 矿床地质, 26(2): 153~162

莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 董国臣, 周肃, 郭铁鹰, 张双全, 王亮亮. 2003 印度—亚洲大陆主碰撞过程与火山作用响应 [J]. 地学前缘, 10: 135~148

莫宣学, 董国臣, 赵志丹, 周肃, 王亮亮, 邱瑞照, 张凤琴. 2005 西藏冈底斯带花岗岩的时空分布特征及地壳生长演化信息 [J]. 高校地质学报 11(3): 281~290.

莫宣学, 赵志丹, DON J D 周肃, 董国臣. 2006 青藏高原拉萨地块碰撞—后碰撞岩浆作用的三种类型及其对大陆俯冲和成矿作用的启示: Sr-Nd 同位素证据 [J]. 岩石学报, 22(4): 795~803.

聂凤军, 胡朋, 江思宏, 李振清, 刘妍, 周永章. 2005 藏南地区金和锑矿床(点)类型及其时空分布特征 [J]. 地质学报, 79: 373~385.

潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦. 2006 冈底斯造山带的时空结构及演化 [J]. 岩石学报, 22(3): 521~533

曲晓明, 侯增谦, 黄卫. 2001 冈底斯斑岩铜矿成矿带: 西藏第二条玉龙铜矿带 [J]? 矿床地质, 20: 355~366

曲晓明, 辛洪波. 2006 西藏班公湖斑岩铜矿带的形成时代与成矿构造环境 [J]. 地质通报, 25: 792~799

余宏全, 丰成友, 张德全, 潘桂棠, 李光明. 2005 西藏冈底斯中东段夕卡岩铜—铅—锌多金属矿床特征及成矿远景分析 [J]. 矿床地质, 24: 508~520

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 [J]. 地质学报, 80(9): 1435~1447

孙晨光, 赵志丹, 莫宣学, 朱第成, 董国臣, 周肃, 陈海红, 谢烈文, 杨岳衡, 孙金凤, 于枫. 2008 青藏高原西南部赛利普超钾质火山岩富集地幔源区和岩石成因: 锆石 U-Pb 年代学和 H 同位素制约 [J]. 岩石学报, 24(3): 249~264.

唐菊兴, 钟康惠, 刘肇昌, 李志军, 董树义, 张丽. 2006 藏东缘昌都大型复合盆地喜马拉雅陆内造山与成矿作用 [J]. 地质学报, 80: 11364~1376

滕吉文, 尹周勋. 1994 青藏高原岩石层三维和二维结构与大陆动力学 [J]. 地球物理学报, 37: 118~130.

田世洪. 2005 青藏高原东缘喜马拉雅期冕西 REE 矿带地质地球化学特征及其成矿动力学研究 [D]. 中国地质科学院博士学位论文, 1~130.

田世洪, 侯增谦, 杨竹森, 杨志明, 袁忠信, 王彦斌, 谢玉玲, 刘英超, 李政. 2008a 四川大陆槽稀土矿床碳酸岩—英碱正长岩 锆石 U-Pb 年代学和 H 同位素性质及其地质意义 [J]. 岩石学报, 24: 544~554

田世洪, 侯增谦, 杨竹森, 陈文, 杨志明, 袁忠信, 谢玉玲, 费红彩, 尹淑苹, 刘英超, 李政, 李小渝. 2008b 川西冕宁—德昌稀土成矿带成矿年代学研究: 热液系统维系时限和构造控矿模型约束 [J]. 矿床地质, 27: 177~187

王安建, 高兰, 刘俊来, 曹殿华, 修群业, 范世家. 2007 论兰坪金顶超大型铅锌矿容矿角砾岩的成因 [J]. 地质学报, 81: 891~897

谢玉玲, 田世洪, 侯增谦, 陈伟, 尹淑苹, 高升. 2008 四川冕宁慕洛稀土矿床稀土元素迁移与沉淀机制: 来自稀土矿物中流体包裹体的证据 [J]. 岩石学报, 24: 555~561.

熊德信, 孙晓明, 翟伟, 石贵勇, 王生伟. 2006 云南大坪金矿含金石英脉中高结晶度石墨包裹体: 下地壳麻粒岩相变质流体参与成矿的证据 [J]. 地质学报, 80: 1448~1456

修群业, 王军, 高兰, 曹殿华, 王安建, 刘俊来, 范世家, 王高尚. 2005 云南金顶矿床矿体三维模型的建立及其研究意义 [J]. 矿床地质, 24: 501~507

肖序常, 李廷栋. 1988 喜马拉雅期岩石圈构造演化总论, 地质专报(五) [M]. 北京: 地质出版社.

许继峰, 王强. 2003 Adakitic 火成岩对大陆地壳增厚过程的指示: 以青藏北部火山岩为例 [J]. 地学前缘, 10(4): 401~406

许志琴, 杨经绥, 李海兵, 张建新, 曾令森, 姜枚. 2006 青藏高原于大陆动力学—地体拼合、碰撞造山即高原隆升的深部驱动力 [J]. 中国地质, 33: 221~238.

杨志明, 侯增谦, 李振清, 宋玉财, 谢玉玲. 2008 西藏驱龙斑岩铜钼矿床中 UST 石英的发现: 出示岩浆流体的直接记录 [J]. 矿床地质, 27: 188~199.

杨竹森, 侯增谦, 高伟, 王海平, 李振清, 孟祥金, 曲晓明. 2006 藏南拆离系锑金成矿特征与成矿模式 [J]. 地质学报, 80: 1377~1391

叶培盛. 2004 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], 1~124.

喻学惠, 莫宣学, 廖忠礼, 赵欣, 苏祺. 2001 西秦岭石榴石—二辉橄榄岩和石榴石—二辉岩包体的温压条件 [J]. 中国科学 (D), 31(增刊): 128~133

喻学惠, 赵志丹, 莫宣学, 王永磊, 肖振, 朱德勤. 2004 甘肃西秦岭新生代钾霞橄黄长岩和碳酸岩的微量、稀土和 Sr-Nd 同位素地球化学: 地幔柱—岩石圈交换的证据 [J]. 岩石学报, 20: 483~494

岳雅惠, 丁林. 2006 西藏林周基性岩脉的 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学、地球化学及其成因 [J]. 岩石学报, 22: 855~866

曾融生, 朱介寿. 1992 青藏高原及东部邻区的三维地震波速度结

构与大陆碰撞模型[J]. 地震学报, 14: 523~533.

赵志丹, 莫宣学, 罗照华, 周肃, 董国臣, 王亮亮, 张凤琴. 2003. 印度—亚洲俯冲带结构—岩浆作用证据[J]. 地学前缘, 10: 149~158.

赵志丹, 莫宣学, NOMADE S, RENNE P R. 周肃, 董国臣, 王亮亮, 朱弟成, 廖忠礼. 2006. 青藏高原拉萨地块碰撞后超钾质岩石的时空分布及其意义[J]. 岩石学报, 22: 787~794.

赵志丹, 莫宣学, 董国臣, 周肃, 朱弟成, 廖忠礼, 孙晨光. 2007. 青藏高原 Pb同位素地球化学及其意义[J]. 现代地质, 21(2): 265~274.

赵志丹, 莫宣学, 孙晨光, 朱弟成, 牛耀龄, 董国臣, 周肃, 董昕. 2008. 青藏高原南部地幔包体的发现及其意义[J]. 岩石学报, 24(3): 193~202.

郑度, 姚檀栋. 2006. 青藏高原隆升及其环境效应[J]. 地球科学进展, 21(5): 451~458.

郑绵平, 王秋霞, 多吉. 1995. 水热成矿新类型—西藏钨硅华矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1~114.

钟大赉, TAPRONNER P, 吴海威, 张连生, 嵇少丞, 钟嘉猷, 刘小汉, SCHARER U, IACASSIN R, LELOUP P. 1989. 大型走滑断层: 碰撞后陆内变形重要形式[J]. 科学通报, 7: 526~529.

References

- BARLEY M E, GROVES D J. 1992. Supercontinental cycles and the distribution of metal deposits through time[J]. *Geology*, 20: 291~294.
- CHANG C F, CHEN N S, COWARD M P. 1986. Preliminary conclusion of the Royal Society and Academia Sinica 1985 geotraverse of Tibet[J]. *Nature*, 323: 501~507.
- CHIG QING H, XUE C, ZENG R. 2006. Modeling of fluid pressure evolution related to sediment loading and thrust faulting in the Lanping basin—implications for the formation of the Jinding Zn-Pb deposit, Yunnan, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 89: 57~60.
- CHIGuoqing, XUE Chunji, LAI Jianqing, QING Haijun. 2007. Sand injection and liquefaction structures of an overpressured fluid system and implications for mineralization[J]. *Economic Geology*, 102: 45: 739~743.
- CHUNG S L, LU D, JI J, CHUM F, LEE H Y, WEND J, LO C H, LEE T Y, QIAN Q, ZHANG Q. 2003. Adakites from continental collision zones: melting of thickened lower crust beneath southern Tibet[J]. *Geology*, 31: 1021~1024.
- CRAWFORD A J, CORBETT K D, EVERARD J. 1992. Geochemistry and tectonic setting of a Cambrian VMS-rich volcanic belt: the Mount Read Volcanics, Western Tasmania[J]. *Economic Geology*, 87: 597~619.
- DENG J F, MO X X, ZHAO H L, WU Z X. 2004. A new model for the dynamic evolution of Chinese lithosphere: continental roots, plume tectonics[J]. *Earth Science Reviews*, 65: 223~275.
- DEWEY J F, SHACKLETON R M, CHANG C, SUN Y. 1988. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society London*, A327: 379~413.
- DING L, KAPP P, ZHONG D L, DENG W M. 2003. Cenozoic volcanism in Tibet: Evidence for a transition from oceanic to continental subduction[J]. *Journal of Petrology*, 44: 1835~1865.

DING L, KAPP P, ZHONG D, DENG W. 2005. Paleocene-Eocene record of ophiolite obduction and initial India-Asian collision: south central Tibet[J]. *Tectonics*, 24: 1~18.

DONG Guocheng, MO Xuanxue, ZHAO Zhidan, GUO Tieying, WANG Liangliang, CHEN Tao. 2005. Geochronologic constraints on the magmatic underplating of the Gangdise belt in the India-Eurasia collision: Evidence of SHRIMP II zircon U-Pb dating[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79: 787~794.

ENGLAND P C, HOUSEMANG A. 1988. The mechanics of the Tibetan Plateau[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society London*, A326: 301~319.

GAO Y F, HOU Z Q, WEIR H. 2003. Post-collisional adakitic porphyries in Tibet: Geochronological and Sr-Nd-Pb isotopic constraints on partial melting of oceanic lithosphere and crust-mantle interaction[J]. *Acta Geologica Sinica*, 77: 123~135.

GAO Y F, HOU Z Q, KAMBER B S, WEIR H, MENG X J, ZHAO R S. 2007a. Adakite-like porphyries from the southern Tibetan continental collision zones: evidence for slab melt-metasomatism[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 153(1): 105~120.

GAO Y F, HOU Z Q, KAMBER B S, WEIR H, MENG X J, ZHAO R S. 2007b. Lamproitic rocks from a continental collision zone: Evidence for recycling of subducted Tethyan oceanic sediments in the mantle beneath southern Tibet[J]. *Journal of Petrology*, 48(4): 729~752.

GAO Yongfeng, HOU Zengqian, WEIRuihua, MENG Xiangjin, YANG Zhiusen. 2008. Eocene high-MgO volcanism in southern Tibet: New constraints from the source characteristics and deep processes[J]. *Lithos*, Doi: 10.1016/j.lithos.2008.02.

GUILD P M. 1972. Metallogeny and the global tectonics. 24th IGC Proceedings, 4: 17~24.

GROVES D J, GOLDFARB R J, GEBREMARIAM M. 1998. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types[J]. *Ore Geology Reviews*, 13: 7~27.

HE Longqing, CHEN Kaiyu, HOU Zengqian, SONG Yucai. 2008. The Himalayan Zn-Pb-Cu-Ag Deposits Controlled by Thrust Systems in the Lanping Foreland Fold Belt, East Tibet[J]. *Ore Geology Reviews* (in press).

HOU Zengqian, WANG Lihua, KHIN Zaw, MO Xuanxue, WANG Mingjie, LIDINGMAY, PAN Guizeng. 2003a. Post-collisional crustal extension setting and VHSM mineralization in the Jinshajiang orogenic belt, SW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 22: 177~199.

HOU Zengqian, MA Hongwen, KHIN Zaw, ZHANG Yuquan, WANG Mingjie. 2003b. The Himalayan Yulong porphyry copper belt produced by large-scale strike-slip faulting at Eastern Tibet[J]. *Economic Geology*, 98: 125~145.

HOU Z Q, GAO Y F, QU X M, RUIZ Y, MO X X. 2004. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in southern Tibet[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 220: 139~155.

HOU Zengqian, ZHONG Dalai, DENG Wanning, KHIN Zaw. 2005. A tectonic model for porphyry copper-molybdenum-gold deposits in the eastern Indo-Asian collision zone. In: Porter T M (ed.), *Super Porphyry Copper & Gold Deposits: A Global Perspective*.

- [M]. FGC Publishing Adelaide 423~440.
- HOU Zengqian, ZENG P S, GAO Y F. 2006 a. The Himalayan Cu-Mo-Au mineralization in the eastern Indo-Asian collision zone: constraints from Re-Os dating of molybdenite. *J. Mineralium Deposita* 41: 33~45.
- HOU Zengqian, TIAN Shihong, YUAN Zhongxin, XIE Yulin. 2006 b. The Himalayan collision zone carbonatites in Western Sichuan, SW China: Petrogenesis, mantle source and tectonic implication. *J. Earth Planet. Sci. Lett.* 244: 234~250.
- HOU Z Q, XIE Y L, XU W Y, LI Y Q, KHIN Zaw, BEAUDON B, RUI Z Y, HUANG W, LUO B Ciren. 2007. Yulong deposit East Tibet: A high-sulfidation Cu-Au porphyry Cu deposit in the eastern Indo-Asian collision zone. *J. International Geology Reviews* 49: 235~28.
- HOU Zengqian, YANG Zhihong, QU Xiaoming, MENG Xiangjin, RUI Zongyao. 2008 a. The Miocene Gangdese porphyry copper belt generated during post collisional extension in the Tibetan Orogen. *J. Ore Geology Review* (in press).
- HOU Zengqian, TIAN Shihong, XIE Yulin. 2008 b. The Himalayan Mianning-Dechang REE belt associated with carbonatite alkaline complex in the eastern Indo-Asian collision zone, SW China. *J. Ore Geology Review* (in press).
- KERRICK R, WYMAN D A. 1990. Geodynamic setting of mesothermal gold deposits: an association with accretionary tectonic regimes. *J. Geology* 18: 882~885.
- JIANG Yaohui, JIANG Shaoyong, LING Hongfei, DAI Baozhang. 2006. Low-degree melting of a metasomatized lithospheric mantle for the origin of Cenozoic Yulong monzogranite porphyry east Tibet. *Geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotope constraints*. *Earth Planet. Sci. Lett.* 241: 617~633.
- JIANG Shihong, NIE Fengjun, HU Peng. 2008. Mayun: An Orogenic Gold Deposit in Tibet, China. *J. Ore Geology Reviews* (in press).
- LAO Zhongji, MO Xuanxue, PAN Guijiang, ZHU Dicheng, WANG Lihuan, JIANG Xinsong, ZHAO Zhidan. 2007. Spatial and temporal distribution of peraluminous granites in Tibet and their tectonic significance. *J. Journal of Asian Earth Sciences* 29(2~3): 378~389.
- LU Y, BERNER Z, MASSONNE H J, ZHONG D L. 2006. Carbonatite-like dykes from the eastern Himalayan suture: geochemical, isotopic and petrogenetic evidence for melting of metasedimentary carbonate rocks within the orogenic crust. *Jour. Asian Earth Sciences* 26: 105~120.
- LUO Z H, XIAO X C, CAO Y Q, MO X, SU S G, DENG J F, ZHANG W H. 2001. The Cenozoic mantle magmatism and motion of lithosphere on the north margin of the Tibetan Plateau. *J. Science in China* 44: 10~17.
- MARIGNAC C, CUNNEY M. 1999. Ore deposits of the French Massif Central: Insight into metallogenesis of the Variscan collision belt. *J. Mineralium Deposita* 34: 472~504.
- MITCHELL A H G, GARSON M S. 1981. Mineral deposits and Global tectonic settings. *Mj. Academic Press Inc. (London) Ltd.* 1~266.
- MO Xuanxue, DENG Jinli. 1999. Three types of lithospheric structure in the Tibetan Plateau. *J. 14th Himalaya Karakoram Tibet Work.*
- shou, Kloster Ettal Germany. *TERRA NOSTRA* 2: 99~100.
- MO Xuanxue, ZHAO Zhidan, ZHOU Su, DONG Guochen, GUO Tieying, WANG Lijiang. 2002. Evidence for timing of the initiation of India-Asia collision from igneous rocks in Tibet. *J. EOS AGU 2002 Fall Meeting Abstracts*, San Francisco.
- MO X X, DONG G C, ZHAO Z D, GUO T Y, WANG L L, CHEN T. 2005. Timing of mafic magmatism in the Gangdese magmatic belt during the India-Asian collision: zircon SHRIMP U-Pb dating. *J. Acta Geologica Sinica* 79: 66~76.
- MO Xuanxue, ZHAO Zhidan, DENG Jinli. 2006. Petrology and geochemistry of post collisional volcanic rocks from the Tibetan Plateau: Implications for lithosphere heterogeneity and collision-induced asthenospheric mantle flow. *J. Geological Society of America, Special Paper* 409: 507~530.
- MO Xuanxue, HOU Zengqian, NIU Yaoling, DONG Guochen, QU X M, ZHAO Zhidan, YANG Z M. 2007. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision: Evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet. *J. Lithos* 96: 225~242.
- MO Xuanxue, NIU Yaoling, DONG Guochen, ZHAO Zhidan, ZHOU Su, KE Shan. 2008. Contribution of syn collisional felsic magmatism to continental crust growth: A case study of the Paleogene Lijiazong Volcanic Succession in southern Tibet. *J. Chemical Geology* 250: 49~67.
- OWEN S T J, ZANDT G. 1997. Implications of crustal property variations for models of Tibetan Plateau evolution. *J. Nature* 387: 37~43.
- ROWE L C M. 1986. Continental underplating model for the rise of the Tibetan Plateau. *J. Earth Planet. Sci. Lett.* 81: 79~94.
- QU X M, HOU Z Q, ZAW K, LI Y G. 2007. Characteristics and genesis of Gangdese porphyry copper deposits in the southern Tibetan Plateau: Preliminary geochemical and geochronological results. *J. Ore Geology Reviews* 31(1~4): 205~223.
- SAWKINS F J. 1990. Metal deposits in relation to plate tectonics. *Mj. Springer-Verlag* 2nd edition: 1~461.
- SELMANN R, KAMPF H, MOLLER P. 1994. Metallogeny of collisional orogenesis. *R. Czech Geological Survey, Prague* 1~434.
- SUN Xiaoming, XING Dexin, SHI Guiyong, WANG Shenwei, ZHAI Wei. 2008. Crust-mantle interaction in the Ailaoshan Gold Belt and its contribution to gold mineralization: A Case Study of Daping Gold Mine in Yunnan Province, China. *J. Ore Geology Reviews* (in press).
- TAPPONNIER P, LACASSIN R, LELOUP P H, SCHAEER U, ZHONG D L, JI S, WU H, ZHONG J, ZHANG L, LU X. 1990. The Ailaoshan/Red River megamorphic belt: Tertiary left lateral shear between Indochina and South China. *J. Nature* 343: 431~437.
- WANG Erchie, BUCHFEL B C. 1997. Interpretation of Cenozoic tectonics in the right lateral accommodation zone between the Ailaoshan shear zone and the eastern Himalayan suture. *J. International Geology Reviews* 39: 191~219.
- WANG D H, YANG J M, YAN S H, XU J, CHEN Y C, FUG P, LUO Y N. 2001 a. A special orogenic type rare earth element deposit in Maoping, Sichuan, China. *J. Geology and Geochemistry Research Geology* 51: 177~188.
- WANG J H, YIN A, HARRISON T M. 2001 b. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone. *Earth Planet. Sci. Lett.* 88: 123~133.

- WANG Q, McDERMOTT F, XU J F, BEILON H, ZHU Y T. 2005. Cenozoic K-rich adakitic rocks in Hohxil area, northern Tibet: Lower crust melting in an intracontinental setting? *J. Geology*, 33: 464~468.
- WANG Erchie, XU Fengyin, ZHOU Jianxun, WAN Jinglin, BURCH-FIELD Clark. 2006a. Eastward migration of the Qaidam Basin and its implications for Cenozoic evolution of the Altyn Tagh Fault and associated river systems. *J. Geological Society of America Bulletin*, 118(3/4): 349~365.
- WANG Y, LI Q, QU G S. 2006b. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotope constraints on the cooling and exhumation history of the southern Tibetan Detachment System, Nyain Area, southern Tibet. In: Law R, Searle M and Godin L (eds), Channel flow, ductile extrusion and exhumation of lower mid crust in continental collision zone. *M. Geological Society London Special Publication*, 268: 327~354.
- WANG Y, ZHANG X M, SUN L X, WAN J L. 2007. Cooling histories and tectonic exhumation stages of the south-central Tibetan Plateau (China): Constrained by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and apatite fission track thermochronology. *J. Journal of Asian Earth Sciences*, 29: 266~282.
- WANG Gang, WAN Jinlin, WANG Erchie. 2008a. Late Cenozoic to Recent Transensional Deformation Across the Southern Part of the GaoJi Song Shear Zone Between the Indian Plate and SE Margin of the Tibetan Plateau and Its Tectonic Origin. *J. Tectonophysics* (in press).
- WANG Shifeng, FAN Chun, WANG Gang, WANG Erchie. 2008b. Late Cenozoic deformation along the northwestern continuation of the Xianshuihe fault system, Eastern Tibetan Plateau. *J. Geological Society of American Bulletin*, doi: 10.1130/B25833.1.
- WILLETTS D, BEAUNONT C. 1994. Subduction of Asian lithospheric mantle beneath Tibet inferred from models of continental collision. *J. Nature*, 369: 642~645.
- XIE Yulin, HOU Zengqian, YIN Shuping, TAN Shihong, XU Wenyi, SMON Dorniy. 2008. Continuous Carbonatitic Melt-Fluid Evolution for a REE Mineralization System: Evidence from Inclusions in the Maoniuping REE Deposit in the western Sichuan, China. *J. Ore Geology Reviews* (in press).
- XU Z, JIANG M, YANG J, ZHAO G, CUI J, LI H, LU Q, XUE G. 1999. Mantle diapir and inward intracontinental subduction: A discussion on the mechanism of uplift of the Qinghai-Tibet Plateau. *J. The Geological Society of America Special Paper*, 328: 19~32.
- XU X W, CAI X P, XIAO Q B, PETER S G. 2007. Porphyry Cu-Au and associated polymetallic Fe-Cu-Au deposits in the Beiya area, western Yunnan Province, South China. *J. Ore Geology Reviews*, 31: 224~246.
- XU Y G, XIA Ping, MENZIES M A, XIAO Long, HUANG X L, MEI H J. 2008a. Temporal and spatial variation in source of the magmatism along the Aijiao Shan Red River Fault Zone, China: Implications for a trans-lithospheric fault and mantle domains. *J. Journal of Petrology* (in revision).
- XU Y G, LAN J B, YANG Q J, HUANG X L, QIU H N. 2008b. Eocene break-off of the Neotethyan slab as inferred from intraplate-type basaltic dykes in the GaoJi Song belt, Eastern Tibet. *J. Earth Planet Sci. Lett.* (in revision).
- XUE Chunji, LIU Shuwen, CHEN Yuchuan, ZENG Rong, ZHAO Shihua. 2004. Giant mineral deposits and their geodynamic setting in the Lanping Basin, Yunnan, China. *J. Acta Geologica Sinica*, 78(2): 368~374.
- XUE Chunji, CHIGUOXIANG, CHEN Yuchuan, WANG Denghong, QING Haijun. 2006. Two fluid systems in the Lanping basin, Yunnan, China: their interaction and implications for mineralization. *J. Journal of Geochemical Exploration*, 89: 436~439.
- XUE C J, ZENG R, LIU G, CHIGUOXIANG, QING H, CHEN Y, YANG J, WANG D. 2007. Geologic fluid inclusion and isotopic characteristics of the Jinding Pb-Zn deposit, western Yunnan, South China. *J. Ore Geology Reviews*, 31: 337~359.
- YANG Z M, HOU Z Q, WHITEN, LIZ Q, SONG Y C, CHANG Z S, XIA D X. 2008a. Geology of the Qulong porphyry copper-molybdenum deposit, Tibet, China. *J. Ore Geology Reviews* (in press).
- YANG Z S, HOU Z Q, MENG X J, FEI H C, TAN SH, LIZ Q, LU Y C. 2008b. Post-Collisional Sb and Au Mineralization Related to the South Tibetan Detachment System in Himalayan Orogen. *J. Ore Geology Reviews* (in press).
- YN A, HARRISON T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *J. Annu. Rev. Earth Planet Sci.*, 28: 211~280.
- ZHANG S Q, MAHONEY J J, MO X X, GHASI A M, MILANI L, CRAWFORD A J, GUO T Y, ZHAO Z D. 2005. Evidence for a widespread Tethyan upper mantle with Indian ocean-type isotopic characteristics. *J. Journal of Petrology*, 24: 1~30.
- ZHAO W L, MORGEN W J. 1985. Uplift of Tibetan Plateau. *J. Tectonics*, 4: 359~369.
- ZHAO Wenjin, NELSON K D. Project INDEPTH Team. 1993. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath south Tibet. *Nature*, 366: 557~559.
- ZHOU Su, MO Xuanxue, DONG Guochen, ZHAO Zhidan, QU Ruizhao, GUO Tieying, WANG Lianjiang. 2004. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of Cenozoic Linzong volcanic rocks from Linzhou Basin, Tibet, China, and their geological implications. *J. Chinese Science Bulletin*, 49(18): 1970~1979.
- ZHU Dicheng, PAN Guifang, MO Xuanxue, LIAO Zhongli, JIANG Xisheng, WANG Lihuan, ZHAO Zhidan. 2007. Petrogenesis of volcanic rocks in the Sangxiu Formation, central segment of Tethyan Himalaya: A probable example of plume-lithosphere interaction. *J. Journal of Asian Earth Sciences*, 29(2~3): 320~335.
- ZHU Dicheng, MO Xuanxue, PAN Guifang, ZHAO Zhidan, DONG Guochen, SHI Yumao, LIAO Zhongli, ZHOU Changyong. 2008. Petrogenesis of the earliest Early Cretaceous basalts and associated diabases from Cona area, eastern Tethyan Himalaya in south Tibet: interaction between the incubating Kerguelen plume and eastern Greater India lithosphere. *J. Lithos*, 100: 147~173.