



国家基础研究计划973项目资助

青藏高原

碰撞造山与成矿作用

侯增谦 王二七 莫宣学 丁 林 潘桂棠 张中杰 等著



地质出版社

国家基础研究计划 973 项目资助

青藏高原 碰撞造山与成矿作用

学 术 指 导

翟裕生 钟大赉 郑绵平 滕吉文 多 吉

主 要 作 者

侯增谦	王二七	莫宣学	丁 林	潘桂棠	张中杰
李光明 ^蓉	秦克章	徐义刚	王安建	曲晓明	余宏全
孙晓明	许继峰	赵志丹	杨志明	江思宏	张洪瑞
杨竹森	田世洪	宋玉财	李光明 ^京	王 瑜	徐文艺
姜耀辉	孟祥金	李振清	董方浏	王立全	高永丰
吕庆田	杨岳清	徐兴旺	赵元艺	边千韬	谢国刚
王宗起	聂凤军	唐菊兴	郑有业	闫全人	薛春纪

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书是国家基础研究计划 973 项目(印度-亚洲大陆主碰撞带成矿作用;2002CB412600)的最终研究成果,是第一部系统阐述大陆碰撞过程与成矿作用的科学研究专著。全书分为上、下两篇。上篇共有 5 章,系统阐述了青藏高原的岩石圈结构构造、大陆碰撞详细过程、地壳变形特征及壳幔岩浆作用;下篇共有 8 章,系统论述了碰撞前增生矿作用、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,详细描述了大陆碰撞带特征的 5 类矿床成矿新模型,初步阐明了青藏高原区域成矿规律,进行了成矿预测与潜力评价。最后,本书综合对比了其他碰撞造山带区域成矿作用,提出了大陆碰撞成矿理论。

本书可供相关专业的生产、教学、科研人员和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

青藏高原碰撞造山与成矿作用/侯增谦等著. —北京:
地质出版社,2008. 1

ISBN 978-7-116-05887-3

I. 青… II. 侯… III. ①青藏高原—造山运动—研究
②青藏高原—成矿作用—研究 IV. P542 P611

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 195369 号

组稿编辑:王大军 白 铁

责任编辑:白 铁 沈 镭 王光辉等

责任校对:黄苏晔

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

电 话:(010)82324508(邮购部);(010)82324579(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zhs@ gph.com.cn

传 真:(010)82310759

印 刷:北京地大彩印厂

开 本:889mm×1194mm $1/16$

印 张:62 插页:1

字 数:1950 千字

印 数:1—1000 册

版 次:2008 年 1 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价:200.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-05887-3

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

绪 论

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。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,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,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作用耦合缺乏深入系统的研究,没能很好地建立起系统完整的成矿理论体系。

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,从而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多位学者参加了这项为期5年的基础研究计划。

一、项目研究概述

该项目围绕“创新大陆碰撞成矿理论框架,完善大陆成矿预测评价体系”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。

围绕项目总体目标,项目共设置了10个研究课题:①地壳挤压增厚构造变形及其成矿响应(王二七负责);②活动裂谷系形成演化与成矿(丁林和许继峰负责);③壳/幔物质交换作用与成矿效应(莫宣学和徐义刚负责);④关键成矿单元深部地壳结构及其成矿约束(张中杰和吕庆田负责);⑤冈底斯-藏东斑岩铜钼金成矿作用(秦克章和曲晓明负责);⑥伸展与拆离系统金锑铍等金属成矿作用(聂风军和赵平负责);⑦藏东缘大型复合盆地铜银多金属成矿作用(王安建和唐菊兴负责);⑧陆-陆碰撞对已有矿床的改造(王宗起负责);⑨成矿潜力评估与战略新区预测(潘桂棠和余宏全负责);⑩印-亚大陆碰撞造山与成矿综合研究(侯增谦和孙晓明负责)。

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,共发表学术论文521篇,其中,SCI收录论文235篇。出版专集7部,其中,《岩石学报》4部,《地质学报》1部,《矿床地质》1部,《Ore Geology Reviews》英文专集1部。3人成为国家自然科学基金获得者,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。

二、主要研究思路

研究大陆碰撞成矿作用,孕育和创立大陆碰撞成矿理论体系,关键在于揭示陆-陆碰撞过程与成矿作用的耦合关系,阐明大陆碰撞过程中造成成矿物质巨量集聚和大规模成矿的关键地质作用及其动力学过程。在印-亚大陆碰撞过程中,至少有三个已被初步揭示的关键地质过程,控制和约束了成矿作用的发生与演化。①下地壳增厚与流动:下地壳增厚是陆-陆碰撞的结果,是壳幔相互作用的产物,既是介于上地壳和上地幔之间的物理和化学构造域,也是成矿启动域。下地壳的流动又控制着上地壳的变形以及大规模流体迁移汇聚和成矿作用。②岩石圈地幔减薄,这一过程不仅诱发了深部岩浆作用,促进了强烈的壳-幔相互作用,而且向上地壳岩浆-流体-成矿系统注入了大量的幔源物质,提供了驱动热流-流体运移的巨大热能;③地壳伸展与走滑剪切:控制了区域性大规模流体活动与成矿物质集聚过程,导致了壳内大型流体库发育和一系列矿床形成就位。从上述被引申的壳幔相互作用理念出发,深刻揭示三个关键过程与成矿作用的成因关联和耦合关系,必将带来大陆碰撞成矿理论的创新与突破。

为了实现大陆碰撞成矿理论的创新与突破,项目主要就下列四个关键科学问题开展了攻关研究。

1) 陆-陆碰撞详细过程与成矿耦合关系。包括 ①下地壳增厚的时间、过程和成因机制;下地壳流变特征和流体大规模侧向迁移机制;②岩石圈地幔减薄拆沉过程中的壳/幔物质熔融及物质记录;幔源物质对成矿系统的贡献方式与贡献程度;③上地壳变形式样、变形时间和深部约束机制;裂谷系统和走滑系统对大规模流体迁移汇聚和成矿系统的时空定位的控制作用;

2) 碰撞过程不同构造背景下的大型成矿系统结构。包括不同成矿系统的时、空结构和物质结构特征与差异;成矿系统所根植的地壳精细结构与主控要素;成矿系统巨量成矿产物的来源和供给通道。

3) 碰撞过程中的大规模岩浆-流体作用与矿质集聚过程。在陆-陆碰撞不同阶段和不同动力学背景下(如下地壳增厚流动、岩石圈拆沉减薄、上地壳伸展-拆离-走滑),岩浆活动和时空分布、岩石组合和源区特征、岩浆起源与成因机制;岩浆-流体系统的发育特征及含矿性;流体系统的流域规模、输导系统和积聚空间;成矿物质来源、迁移和巨量集聚过程。

4) 碰撞-隆升作用对已有矿床的改造过程。陆-陆碰撞和高原隆升过程对已有矿床的改造方式、改造类型、改造过程以及改造过程中元素的聚散机理。

三、主要研究进展

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,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取得了大批创新性成果。

(一) 碰撞造山作用与成矿构造背景研究方面

在前人大量研究基础上,本项目主要就陆-陆碰撞的时限、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”发育时限等问题进行了系统研究,取得重要进展:

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(65~41Ma)、晚碰撞转换(40~26Ma)和后碰撞伸展(25~0Ma)三个阶段连续演化历程,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,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。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。

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。重新厘定主碰撞带的大地构造,识别出主碰撞带发育8个主要的构造单元和26个次级构造单元,编制了青藏高原新一代地质图;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,发现裂谷发生在高原地壳构造加厚之后,主要发育在18~13Ma,深部过程对裂谷的形成上起主导作用;初步查明藏南拆离系形成时间和动力机制,发现东碰撞带下地壳流动新证据;提出高原东缘块体旋转是调整和吸纳碰撞应力应变的主导机制,提出2种主要的旋转构造式样及其形变机制;发现主碰撞带存在两类地壳:新生地壳与再循环地壳,存在两种地壳增厚机制:挤压缩短增厚和地幔物质注入增厚机制,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。

(二) 区域岩浆作用与壳/幔交换研究方面

系统建立了青藏高原火山-岩浆作用事件序列和时空分布规律,提出主碰撞带经历过三个岩浆作用及三种不同的壳/幔作用过程,即50Ma前后以幔源岩浆底侵-壳/幔源岩浆混合作用,40Ma前后大规模走滑诱发的地幔上隆/横向流动及其幔源岩浆组合,16Ma前后以岩石圈拆沉作用和地壳伸展为特色的钾质-超钾质岩浆作用;发现高原东缘岩石圈挤出与软流圈上涌的岩石学新证据,提出横向流动和软流圈上涌是高原东缘晚碰撞大规模岩浆-成矿作用的深部机制;发现印度大陆俯冲板片在40~45Ma发生断离的岩石学新证据,提出板片深部断离过程是导致主碰撞晚期阶段应力场出现伸展松弛的重要机制;发现高原地幔至少存在三种地球化学端元,即新特提斯大洋岩石圈端元,印度陆下岩石圈端元和新特提斯闭合前青藏原有的岩石圈端元,三者以不同比例存在于高原的不同地域并发生着相互作用;识别出青藏高原现今存在三种岩石圈类型:即增厚的岩石圈,减薄的岩石圈,和加厚-减薄-再加厚的岩石圈;综合研究,提出了高原腹地岩浆作用的地球动力学演化新模型和高原东缘(高黎贡构造带)构造-岩浆演化新机制。

(三) 大陆成矿作用研究方面

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。大陆碰撞成矿理论体系包括三大成矿作用,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(逆冲)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(65~41Ma)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Au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Au矿、壳源低 fO_2 花岗岩浆-热液型Sn矿和壳幔混源高 fO_2 岩浆-热液型Cu-Au-Pb-Zn-Mo-Fe矿床。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)由Au→Sn-W-稀有金属→Cu-Au-Mo-Fe矿化分带趋势。主碰撞期不仅成矿而且成大矿的理论认识,突破了长期以来束缚人们的概念;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(40~26Ma)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-Au矿和碳酸岩REE矿床、造山型Au矿和热液型Pb-Zn-Ag矿床的形成;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(25~0Ma),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、与岩浆驱动热液系统有关的脉型 Sb-Au 成矿系统、与后碰撞岩浆-热液活动有关的矽卡岩型和热液脉型 Pb-Zn-Ag 成矿系统以及与壳内岩浆房有关的现代热泉型 Cs-Au 成矿系统。它们在上地壳层次受三大构造系统控制,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。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) 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四种大陆环境均可以产生巨型斑岩铜矿,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),来源于加厚的镁铁质新生下地壳,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 fO₂ 并发生大规模成矿的根源;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或垂直切割碰撞带的正断层系统控制。浅成侵位的含矿岩浆大致在 5~8km 深处发育大型岩浆房,在高温(≥573℃)、高压条件下(≥150~200MPa),直接出溶高温、高盐度(44.5%~58% NaCl)、高氧逸度的成矿流体,形成斑岩型 Cu 矿。由此创造性地提出了“大陆型斑岩铜矿”成矿新模型,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。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。

3) 初步建立了若干矿床的成矿新模型,揭示了大陆碰撞带成矿机理。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-排泄形成矽卡岩型 Pb-Zn 矿新认识,由此建立了“碰撞造山型 Pb-Zn 矿”成矿新模型;通过对金顶超大型 Pb-Zn 矿的精细研究,首次提出了“盐穹控矿”新模型,强调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沉淀成矿;通过对哀牢山 Au 矿带的系统研究,证实碰撞造山带可以产出大型造山型金矿,系统地提出了碰撞造山型 Au 矿成矿新模型;通过对冕宁-德昌 REE 成矿带系统研究,提出了成矿带 REE 矿化的“三层楼”模型和造山型 REE 矿床成矿模型;通过对藏南拆离系及其成矿作用研究,提出了以拆离系环境岩浆驱动古地热流体系统与 Sb-Au 成矿新模型;通过对腾冲锡矿带系统研究,提出了主碰撞汇聚环境 Sn 叠合成矿新机制。

(四) 成矿规律与成矿预测研究方面

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,首次评估了主碰撞带 Cu、Pb、Zn、Ag 资源潜力,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,划分出三大成矿省以及 11 个Ⅲ级或Ⅳ级成矿带;建立并完善了全区 1:150 万矿产数据库,编制了主碰撞带 1:150 万系列综合性基础图件,如 1:150 万构造单元图、地质矿产分布图、综合成矿信息图;以 MAPGIS 为平台,建立了主碰撞带主要矿产评价指标体系和成矿预测模型,评估了主要矿种的资源潜力;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、镓金以及富铁矿的矿化集中区 12 个。为青藏高原专项工作部署提供了重要理论依据,为区域矿产勘查评价提供了重要理论指导。

2) 提出了极低工作程度区成矿预测新思路和新方法,解决了制约找矿突破的瓶颈问题。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。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,识别和提取低缓、微弱及隐蔽信息,强化矿致异常,凸现“低缓、无矿”异常,在冈底斯矿带

圈定了一批找矿靶区,并发现了一批矿床。

3)初步评价了若干重要成矿区带成矿远景,预测并提出了一批新的成矿区带。评价了青藏高原第三条斑岩铜矿带-班公湖-怒江斑岩铜矿带的成矿远景,提出班公湖-怒江带具有形成世界级富金斑岩铜矿的潜力;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,为在冈底斯西段寻找大型富 Pb、Zn、Ag 矿指明了找矿方向;通过冈底斯成矿带东段斑岩系统与矿化系统的分析研究,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;预测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,为在青藏高原突破造山型 Au 或 Cu-Au 矿床提供了重要的理论指导;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,可望取得突破。

4)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。在项目提出的一批找矿靶区,主持矿产概查和评价,取得找矿突破。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;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;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;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。

四、关于本书的编写

本书是 973 项目的初步总结性成果,是项目全体科研人员的集体劳动结晶。本书的编写提纲由首席科学家侯增谦博士提出,并由项目专家委员会及项目组全体成员讨论通过。全书分上、下两篇。绪论由侯增谦和王二七执笔;第一章由潘桂棠和李光明执笔;第二章由丁林、许继峰、王二七、王瑜和边千韬执笔;第三章由王二七执笔;第四章由莫宣学、徐义刚、赵志丹、姜耀辉执笔;第五章由张中杰、吕庆田执笔;第六章由侯增谦、杨竹森、孟祥金、李振清、高永丰等执笔;第七章 1~6 节分别由侯增谦、王立全、杨岳清、杨志明、李光明、谢国刚及秦克章、曲晓明等执笔;第八章 1~7 节分别由侯增谦、江思宏、董方浏、秦克章、徐文艺、孟祥金等执笔;第九章 1~6 节分别由侯增谦、杨志明、田世洪、孙晓明、宋玉财及徐兴旺执笔;第十章 1~5 节由侯增谦、曲晓明、李光明、杨竹森、李振清及杨志明、赵元艺、秦克章等执笔;第十一章 1~4 节分别由杨志明、江思宏、田世洪、王安建及宋玉财、孙晓明、侯增谦等执笔;第十二章由李光明和余宏全执笔;第十三章由张洪瑞和侯增谦执笔。全书最后由侯增谦统纂、定稿。王晓虎、李政、刘英超、王光辉、李真真、王召林、江迎飞、郝百武等研究生对书稿做了大量的编辑校对、图表制作和补充修改工作。

除上述主要章节执笔人外,项目主要研究人员芮宗瑶研究员、李继亮研究员、刘俊来教授、刘树文教授、喻学惠教授、罗照华教授、王强研究员、谢玉玲教授、刘焰研究员、董国臣教授、周肃教授、高兰研究员、李佑国教授、曾普胜研究员、丰成友研究员、陈文研究员、江万研究员、国连杰研究员、朱第成研究员、廖忠礼研究员、薛传东教授、黄小龙研究员等一批学者和百余名研究生,都为本项目贡献了大量创新性研究成果和重要的学术贡献,并为本书的成果总结提供了坚实的资料基础。因时间匆忙和篇幅限制,许多科研成果未能在本书充分反映,其中不少理论认识仍有提升空间,不少学术观点仍有商榷之处。

在项目研究过程中,项目专家组成员翟裕生院士、钟大赉院士、郑绵平院士、滕吉文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始终给予悉心指导和全力帮助,使项目按整体科学目标顺利实施。科技部 973 计划专家顾问孙枢院士为项目的成功启动发挥了重要作用,陈毓川院士为项目的组织实施提供了重要指导。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。

在项目实施和书稿编写过程中,得到科技部基础司有关领导、973 项目管理办公室张峰处长、国土资源部张洪涛总工、部勘查司彭齐鸣司长、部科技司黄宗理司长、白星碧副司长、高平处长、马岩处长、中

科院资环局周少平处长,中国地质科学院张彦英院长、张陟书记、朱立新副院长、董树文副院长,中国地质调查局卢民杰副主任、薛迎喜副主任等领导,中国地质科学院矿产资源研究所王瑞江所长、张佳文副书记、毛景文副所长,中国地质科学院地质研究所耿元生副所长、高锦曦副所长、沈琳副书记,中国科学院地质与地球物理研究所丁仲礼所长、朱日祥所长、翟明国副所长以及项目各参加单位的领导和同仁的亲切关怀、悉心指导和大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

目 录

绪论	(I)
----------	-------

上篇:青藏高原碰撞造山

第一章 碰撞前弧盆系时空结构与构造演化	(3)
第一节 碰撞前弧盆系时空结构	(3)
第二节 班公湖-怒江结合带	(15)
第三节 主碰撞带大地构造演化	(18)
第四节 羌塘-三江造山系构造演化	(22)
参考文献	(26)
第二章 正向碰撞带构造演化	(30)
第一节 大陆碰撞造山过程	(30)
第二节 平行主碰撞造山带的伸展作用	(37)
第三节 垂直主碰撞造山带的伸展作用	(45)
第四节 平行造山带的伸展构造和垂直造山带南北向裂谷的控矿作用	(63)
参考文献	(88)
第三章 斜向转换带构造演化	(98)
第一节 旋转构造基本类型与特征	(99)
第二节 地质和地貌背景	(101)
第三节 书斜式旋转	(104)
第四节 绕轴旋转运动	(107)
第五节 旋转运动的主要协调构造:红河-哀牢山剪切带	(109)
第六节 青藏高原东南缘旋转构造演化	(121)
参考文献	(126)
第四章 青藏高原的岩浆活动与壳/幔相互作用	(130)
第一节 青藏高原岩浆岩的时空分布格局	(130)
第二节 青藏高原冈底斯带的超钾质岩石	(147)
第三节 高黎贡-腾梁-盈江带中-新生代岩浆作用及其构造意义	(164)
第四节 玉龙斑岩铜矿带含矿斑岩岩石成因	(219)
第五节 岩浆活动与壳-幔相互作用	(231)
参考文献	(239)
第五章 青藏高原地球物理探测与壳幔结构	(255)
第一节 藏南特提斯喜马拉雅带域地壳结构	(255)
第二节 藏中拉萨地块北部地壳结构	(266)
第三节 西藏拉萨地块跨过南北向正断层的地壳结构	(277)
第四节 西藏错勤-申扎大地电磁测深与电阻率断面	(289)

第五节 冈底斯地区电性结构与成矿作用	(297)
参考文献	(300)

下篇:大陆碰撞成矿作用

第六章 碰撞造山带主要成矿事件与矿床时空分布	(315)
第一节 碰撞前主要成矿事件及其空间分布	(315)
第二节 主碰撞期成矿事件与矿床空间分布	(331)
第三节 晚碰撞期成矿事件与矿床空间分布	(337)
第四节 后碰撞期成矿事件与矿床空间分布	(347)
参考文献	(353)
第七章 碰撞前增生造山成矿作用	(361)
第一节 四川呷村火山成因块状硫化物 Pb-Zn-Cu 矿床	(361)
第二节 云南鲁春火山成因块状硫化物铜矿床	(382)
第三节 云南大平掌火山成因块状硫化物铜多金属矿床	(396)
第四节 义敦岛弧带斑岩铜矿——以中甸普朗铜矿为例	(406)
第五节 斑公湖-怒江带斑岩铜矿——以多不杂富金斑岩铜矿为例	(413)
第六节 冈底斯带矽卡岩型铁矿——以尼雄铁矿为例	(438)
参考文献	(448)
第八章 主碰撞汇聚成矿作用	(455)
第一节 主碰撞汇聚构造背景与成矿环境	(455)
第二节 造山型金矿成矿作用——以马攸木金矿为例	(462)
第三节 与壳源花岗岩有关的锡-稀有金属成矿作用	(479)
第四节 斑岩型钼成矿作用——以沙让钼矿为例	(505)
第五节 复合型 Cu-Au 矿床——以雄村矿床为例	(511)
第六节 与壳-幔混源花岗岩有关的 Pb-Zn-Ag 成矿作用	(538)
第七节 区域成矿模型与构造控制	(552)
参考文献	(556)
第九章 晚碰撞转换成矿作用	(565)
第一节 晚碰撞转换构造背景与成矿环境	(565)
第二节 斑岩型 Cu-Mo-Au 成矿作用	(570)
第三节 岩杂岩型稀土成矿作用	(601)
第四节 造山型金成矿作用	(624)
第五节 热液型银多金属成矿作用	(639)
第六节 区域成矿模型与构造控制模型	(660)
参考文献	(665)
第十章 后碰撞伸展成矿作用	(681)
第一节 后碰撞伸展构造背景	(681)
第二节 斑岩型 Cu-Mo 成矿作用——冈底斯斑岩铜矿带为例	(686)
第三节 矽卡岩-斑岩型-热液脉型 Cu、Au 多金属成矿作用	(737)
第四节 热液脉型 Sb-Au 成矿作用	(746)
第五节 热泉 Cs-Au 成矿作用	(767)
第六节 区域成矿模型与构造控制模型	(783)
参考文献	(786)

第十一章 碰撞造山带典型矿床成矿新模型	(798)
第一节 碰撞造山型斑岩铜矿成矿模型	(798)
第二节 碰撞造山型金矿成矿模型	(820)
第三节 碰撞造山型稀土矿床成矿模型	(830)
第四节 金顶式铅锌矿床成矿模型	(840)
参考文献	(858)
第十二章 主碰撞带成矿规律与成矿预测	(872)
第一节 主要成矿区带与区域成矿规律	(872)
第二节 区域成矿预测方法与综合信息评价系统	(882)
第三节 区域成矿预测模型与预测指标体系	(887)
第四节 成矿预测与找矿远景区圈定	(897)
第五节 成矿潜力评估与战略新区预测	(905)
参考文献	(916)
第十三章 碰撞造山带区域成矿对比研究	(920)
第一节 东特提斯成矿域的成矿作用	(920)
第二节 东特提斯成矿域主要成矿带特征	(929)
第三节 秦岭碰撞造山带碰撞过程与成矿	(938)
第四节 大陆碰撞造山成矿理论体系	(947)
第五节 碰撞造山带成矿系统与矿床分类	(961)
参考文献	(964)

上篇：青藏高原碰撞造山

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; Xu et al., 1999; 郑度等, 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 and Morgan, 1985), 印度地幔岩石圈向亚洲俯冲模型(Powell, 1986; Owen and Zarldt, 1997), 亚洲大陆岩石圈向南俯冲模型(Willett and Beaumont, 1994), 分布式缩短增厚模型(Chang, et al., 1986; England and Houseman, 1988; Dewey, et. al., 1988), 大型走滑-逃逸模型(Tapponnier, 1990, 1992) 和周边俯冲模型(Xu et al., 1999) 等等。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, 等等。从区域成矿角度看, 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、大陆碰撞带的壳/幔结构与深部过程、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。

“印度-亚洲大陆主碰撞带成矿作用”973 项目, 立足于青藏高原碰撞造山带, 围绕上述重大科学问题, 进行了大量的野外调查与系统的深入研究, 大大增进了对大陆碰撞造山过程及机制的理解和认识。本篇第一章概述了印度-亚洲大陆碰撞前的特提斯构造格架及地质演化; 第二章系统阐述了印-亚大陆正向碰撞带的碰撞造山过程与构造演化; 第三章系统阐述了斜向构造转换带的地质特征与旋转构造; 第四章系统阐述了青藏高原的岩浆活动与深部壳/幔作用; 第五章系统总结了青藏高原地球物理探测结果及其壳/幔结构。这些成果为建立大陆碰撞成矿理论体系奠定了坚实的基础。

第一章 碰撞前弧盆系时空结构与构造演化

第一节 碰撞前弧盆系时空结构

青藏高原主碰撞带碰撞前特提斯阶段的地质构造演化模式有“剪刀张”、“传送带”和“手风琴运动与开合”、“多岛洋或多岛海模式”等(常承发等,1973;黄汲清等,1987;刘增乾等,1990;肖序常等,2000;刘本培等,1993,2002;钟大赉,1993,1998)。许靖华(1992,1993,1994)通过对青藏高原各大造山带的大地构造相的解剖和研究,提出多岛弧构造模式假说(Hsü K. J. et al., 1995)。潘桂棠等(1997)将在大陆岩石圈与大洋岩石圈构造体制转换的时空域中,由大洋岩石圈俯冲作用制约的弧后扩张,导致众多岛弧(残余弧或微陆块)与弧后盆相间错列,具有特定结构、构造和时间演化特征的构造系统,称为多岛弧盆系构造。它包括前锋弧及其之后的一系列岛弧、火山弧、海岭、岛链、洋岛、海山、微陆块和相应的弧后洋盆、弧间盆地或边缘海盆地等。目前东南亚和太平洋西岸弧盆系的空间配置表明,东南亚是新生代多岛弧盆系构造发育最典型的地区,青藏高原特提斯构造演化可以与东南亚和太平洋西岸弧盆系对比(潘桂棠等,1997;2005?)。

按照“多岛弧盆系”的学术思想,笔者将青藏高原主碰撞带涉及的地区划分为5个一级构造单元,13个二级构造单元和37个三级构造单元(表1-1,图1-1)。

表 1-1 主碰撞带及邻区大地构造单元划分

I 级构造单元	II 级构造单元	III 级构造单元
I 印度陆块	I -1 锡伐利克后造山前陆盆地带	
II 冈底斯-喜马拉雅造山系	II -1 喜马拉雅地块	II -1-1 拉轨岗日被动陆缘盆地
		II -1-2 北喜马拉雅碳酸盐岩台地
		II -1-3 高喜马拉雅基底杂岩带
		II -1-4 低喜马拉雅被动陆缘盆地
	II -2 印度河-雅鲁藏布江结合带	II -2-1 雅鲁藏布蛇绿混杂岩带
		II -2-2 仲巴地块
		II -2-3 朗杰学增生楔(T_3)
	II -3 拉达克-冈底斯-伯舒拉岭弧盆系	II -3-1 那曲-洛隆弧前盆地(T_3 -J)
		II -3-2 昂龙冈日-班戈-腾冲岩浆弧(K)
		II -3-3 狮泉河-申扎-嘉黎结合带(J-K)
		II -3-4 措勤-申扎岛弧(J_3 - K_1)
		II -3-5 隆格尔-工布江达复合岛弧(P、T、K)
		II -3-6 拉达克-冈底斯-下察隅岩浆弧(J_3 - K_1 、 K_2 -E)
		II -3-7 日喀则弧前盆地带(K_2)
	II -4 缅甸弧盆系	II -4-1 密支那蛇绿混杂带
		II -4-2 缅甸中央低地火山弧
		II -4-3 萨亚玛迪山蛇绿混杂带
		II -4-4 那加-阿拉干弧前增生楔

续表

I 级构造单元	II 级构造单元	III 级构造单元
III 班公湖-怒江-昌宁-孟连结合带	III-1 班公湖-怒江蛇绿混杂岩(P-K ₁)	
	III-2 聂荣残余弧(Pz)	
	III-3 嘉玉桥残余弧(Pz)	
	III-4 昌宁-孟连蛇绿混杂岩(P-K ₁)	
IV 羌塘-三江造山系	IV-1 羌塘弧盆系	IV-1-1 羌北地块(弧后前陆盆地 T ₃ -J)
		IV-1-2 龙木错-双湖结合带(高压、超高压折返带)(P-T)
		IV-1-3 托和平错-查多岗日洋岛海山(P ₂ -T ₃)
		IV-1-4 羌南地块(前陆盆地 T ₃ -J)
	IV-2 三江弧盆系	IV-2-1 甘孜-理塘结合带(P ₂ -T ₃)
		IV-2-2 沙鲁里-义敦岛弧带(T ₃)
		IV-2-3 中咱-中甸地块
		IV-2-4 金沙江-哀牢山结合带(C-P-T ₂)
		IV-2-5 治多-江达-维西-绿春陆缘弧(P ₂ -T ₃)
		IV-2-6 昌都-兰坪中生代双向弧后前陆盆地
		IV-2-7 开心岭-杂多-云县-景洪陆缘弧带(P ₂ -T)
		IV-2-8 乌兰乌拉湖-北澜沧江结合带(C-P)
		IV-2-9 左贡地块(前陆盆地 T ₃ -J)
		IV-2-10 东达山岩浆弧(P-T)
		IV-2-11 碧罗雪山-崇山地块
		IV-2-12 临沧岩浆弧(P-T)
	IV-3 保山地块	
	IV-4 玉龙塔格-巴颜喀拉前陆盆地(T ₃)	IV-4-1 可可西里-松潘前陆盆地(T ₃)
		IV-4-2 炉霍-道孚蛇绿混杂带
		IV-4-3 雅江残余盆地(T ₃)
V 扬子陆块		

由于印度陆块(I)和扬子陆块(V)前人研究较多,且主体位于研究区以外,在此笔者仅对冈底斯-喜马拉雅造山系(II)、班公湖-怒江-昌宁-孟连结合带(III)和羌塘-三江造山系(IV)的时空结构进行简述。

一、冈底斯-喜马拉雅造山系(II)

(一)喜马拉雅地块(II-1)

1. 拉轨岗日被动陆缘盆地(II-1-1)

以中生界广为分布,三叠系和侏罗系为浅海沉积,白垩系出现次深-深海沉积为特征。中-新元古界拉轨岗日岩群(Pt₂₋₃)主要由云母石英片岩、石榴云母片岩、十字石蓝晶石片岩、片麻岩、混合岩、混合片麻岩等组成。下古生界曲德贡岩组(Pz₁)与下伏地层呈断层接触,由含榴二云片岩、石榴千糜岩、变粒岩、绿泥片岩、二云石英片岩、含石榴千糜岩、大理岩等组成。石炭系少岗群(C₁₋₂)下部为粉砂质碳质绢云板岩、千枚岩,上部为灰色厚层大理岩化灰岩、含石英大理岩。二叠系包括破林浦组、比崴组、康马组和白定浦组,由粉砂质板岩、冰海相含砾砂岩、长石石英砂岩和结晶灰岩、白云质灰岩组成。

三叠系平行不整合于二叠系之上,可划分为吕村组和涅如组,岩性为粉砂质板岩为主夹钙质细砂

岩、石英砂岩。侏罗系日当组(J_{1-2})以灰黑色页岩为主,夹薄层砂岩、粉砂岩及泥灰岩,局部夹安山岩和凝灰岩,化石丰富,陆热组(J_2)为灰色-灰黑色微晶灰岩、泥灰岩与钙质页岩、泥岩互层,遮拉组(J_{2-3})为灰色-灰黑色、杂色薄-中厚层(钙质)细砂岩与砂质、钙质页岩互层,夹玄武岩、安山岩、硅质岩及灰岩,上统维美组(J_3)为海滩相灰白色厚层粗-细粒(含砾)石英砂岩。上侏罗统一下白垩统桑秀组(J_3-K_1),为一套安山岩、玄武岩、凝灰岩、凝灰质砂岩及粉砂岩、粉砂质或钙质页岩及少数灰岩透镜体的火山-碎屑岩组合,局部夹砾岩。早白垩世开始,海平面迅速上升,出现了一套含缺氧事件的次深-深海碎屑沉积。下白垩统甲不拉组(K_1),为一套向上迅速加深的陆架-半深海相灰黑色粉砂质页岩、硅质页岩夹薄层钙质页岩、泥灰岩,上白垩统宗卓组(K_2)为一套次深-深海相黑色、深灰色页岩、钙硅质页岩及砂岩,上部发育有大量的滑塌角砾和岩块的滑塌沉积,局部夹火山碎屑岩和玄武岩。古近系分布局限,为浅海相碎屑沉积,岩性为青灰色厚-巨厚层含凝灰质粉、细砂岩夹页岩,未见顶。

2. 北喜马拉雅碳酸盐岩台地(Ⅱ-1-2)

位于喜马拉雅山北坡,南以主拆离断裂(STDS),北以吉隆-定日-岗巴-洛扎断裂为界。区内主要地层发育齐全,奥陶系至古近系为连续的浅海沉积。

奥陶系下、中统称甲村组和沟陇日组,发育灰岩、白云质灰岩组合,产丰富的头足类、珊瑚、牙形石等化石。上奥陶统红山头组为棕灰、紫红色钙质、粉砂质页岩夹细砂岩,厚70~100m。志留系下部石器坡组为石英砂岩、钙质页岩、粉砂质页岩,含丰富的笔石,厚87~181m。上部普鲁组主要为粉砂质灰岩、泥质条带灰岩、瘤状灰岩、砂质大理岩夹少量粉砂岩,厚35~700m。

泥盆系凉泉组(D_1)为灰色粉砂岩、页岩与薄层灰岩、泥灰岩互层,厚400m,波曲组(D_{2-3})为浅灰色中粗粒石英砂岩。亚里组(D_3-C_1)以灰黑色薄层灰岩、页岩为主夹砂岩,厚66~100m。石炭系下统纳兴组由以灰白、灰黄色钙质长石石英砂岩为主夹粉砂质页岩或细砾岩、含砾砂岩的“砂岩层段”,与以深灰色粉砂质页岩为主夹粉砂岩、砂岩的“页岩层段”相间的旋回层组成,砂岩层段中常发育有砂质介壳灰岩透镜体,300~1980m。二叠系包括基龙组和色龙群。基龙组(P_1)为冰海相深灰色、墨绿色含砾板岩、含砾砂岩,砂岩夹页岩、粉砂岩组成,产冷水动物群化石,厚30~970m,色龙群(P_{2-3})下部为含舌羊齿植物化石的中-细粒石英砂岩夹页岩,上部为砂质页岩、粉砂岩夹生屑灰岩,厚度300~355m。

三叠系下-中统土隆群(T_{1-2})主要为生物碎屑灰岩、砂质灰岩、瘤状灰岩夹砂质页岩及粉、细砂岩,厚45~650m。上统下部的曲龙共巴组主要为灰绿、灰黑色页岩、粉砂质泥岩夹砂岩,产鱼龙及丰富的双壳类、菊石等化石,厚500~1500m;上部的德日荣组以滨岸相灰白色石英砂岩夹细砾岩为主夹泥页岩,厚60~183m,与下伏曲龙共巴组呈平行不整合接触,为区域一个重要层序界面。侏罗系下、中统包括普普嘎组(J_1)、聂聂雄拉组和拉弄拉组(J_2),主要为一套灰色-深灰色砂质页岩、砂岩与鲕粒、生屑灰岩不等厚互层,局部见点礁,化石丰富,厚度1230~2210m。中-上侏罗统称门卡墩组(J_{2-3}),为灰黑、灰绿色砂质或粉砂质页岩夹细砂岩及砂质灰岩,顶部为约30m厚的滨海相石英砂岩,含丰富的菊石、双壳类、箭石及腕足类等化石,厚241~1278m。白垩系古错村组(K_1)为一套含钙质结核的深灰色粉砂质或泥质页岩夹含火山岩屑细、粉砂岩,产丰富的菊石和双壳类化石,厚636m。岗巴群(K_{1-2})下部为灰黑色页岩夹少量粉砂岩、细砂岩,厚310~944m;中部为灰黄色粉砂岩、粉砂质页岩夹薄层状或透镜状泥灰岩,厚98~320m;上部为黑色、深灰色页岩、钙质页岩夹泥灰岩、粉砂岩,厚226~500m。宗山组(K_2)为一套灰色中-厚层块状生屑灰岩夹泥灰岩及钙质页岩,化石丰富,厚200~400m。

古近系基堵拉组(E_1)为褐色、灰白色钙质石英砂岩夹砂质灰岩,厚120~380m。宗浦组(E_{1-2})以灰色厚层状灰岩为主,少量薄层泥质灰岩,上部夹杂色页岩,厚380~580m。遮普惹组(E_2)由灰色、灰黄色灰岩与灰黑、灰绿及紫红色砂质页岩相间组成,厚147~1285m,未见顶。新近系上新统沃马组(N_2)不整合于下伏地层之上,为一套河湖相泥岩、粉砂岩、砂岩、砾岩,含三趾马动物群及孢粉,厚141~485m。

3. 高喜马拉雅基底杂岩带(Ⅱ-1-3)

该单元介于藏南拆离系(STDS)与主中央断层(MCT)之间,以大面积出露元古宇结晶岩系和浅变质岩为特征。

中-新元古界结晶岩系在印度西北部称 Vaikrita 系,在尼泊尔称 Dhumpu 片麻岩,在不丹称 Thimpu