

DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.05004

潘桂棠,王立全,尹福光,耿全如,李光明,朱弟成,2022. 青藏高原形成演化研究回顾、进展与展望. 沉积与特提斯地质,42(2):151-175. DOI: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.05004.

PAN G T, WANG L Q, YIN F G, GENG Q R, LI G M, ZHU D C, 2022. Researches on geological-tectonic evolution of Tibetan Plateau: A review, recent advances, and directions in the future. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(2):151-175. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.05004.

青藏高原形成演化研究回顾、进展与展望

潘桂棠¹, 王立全¹, 尹福光², 耿全如¹, 李光明¹, 朱弟成³

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2. 中国地质调查局应用地质调查中心, 四川 成都 610036; 3. 中国地质大学(北京) 科学研究院, 北京 100083)

摘要:青藏高原形成演化涵盖了前身的东特提斯地质构造演化、新生代地质构造演化和高原隆升对气候环境演变的制约,它不仅包含有关全球构造的空间格局、运动状态的历史记录,而且也留下了青藏特提斯洋陆转换、盆地转换构造体制的时空结构、运动形式和发展变化的地质遗迹。所以青藏高原是研究全球构造的窗口,被自然科学工作者誉为解决地球动力学的一把钥匙。自20世纪60年代以来,特别是1979年以来我们先后开展了青藏高原地质构造演化、系列编图及综合集成等研究工作。本文以认识现今青藏高原地质历史各阶段重大地质构造事件的结构组成和演化为主线,回顾了40年来历次重大青藏高原基础地质研究过程,系统总结了青藏高原新生代隆升过程、碰撞构造效应,以及东特提斯地质调查研究中一系列重要新发现、新进展、新成果,并对相关研究成果和新发现进行了简要的归纳梳理。在此基础上,就青藏高原形成演化模式、科学理论与学术争论观念层次上的问题,以及关键的基础地质问题等方面进行了讨论与展望。

关键词:青藏高原;新生代地质构造;碰撞构造效应;多岛弧盆系构造;特提斯演化

中图分类号:P548

文献标识码:A

Researches on geological-tectonic evolution of Tibetan Plateau: A review, recent advances, and directions in the future

PAN Guitang¹, WANG Liquan¹, YIN Fuguang², GENG Quanru¹, LI Guangming¹, ZHU Dicheng³

(1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China; 2. Research Center of Applied Geology, China Geological Survey, Chengdu 610036, China; 3. Institute of Earth Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The geological-tectonic evolution of Tibetan Plateau covers the evolution of the Eastern Tethys (the predecessor of Tibetan Plateau), the Cenozoic Tibetan Plateau uplifting, and its constraints on climate and environment. The topic not only contains the historical records of spatial framework and movement related to global tectonics, but also leave abundant geological traces of spatial-temporal framework, tectonic movement, and developments of ocean-continent and basin-orogeny transition systems resulted from global lithospheric evolution process in the Tibetan Plateau. Therefore, the Tibetan Plateau is an ideal subject to research the global structure,

收稿日期: 2022-01-12; 改回日期: 2022-04-12; 责任编辑: 黄春梅; 科学编辑: 曹华文

作者简介: 潘桂棠(1941—), 研究员, 国家科技进步特等奖获得者, 原成都地质矿产研究所所长、原中国地质调查局成都地质调查中心主任, 长期从事青藏高原及特提斯地质研究

资助项目: 中国地质调查局项目《西南地区区域基础地质调查》(编号: DD20221635); 国家自然科学基金新项目《特提斯构造域地质构造编图及区域对比研究》(项目编号: 92055314)

and a key to reveal the global geodynamics. A number of researches on geological-tectonic evolution, basic geological maps compilation, and comprehensive integration have been successively carried out by our group in this region since the 1960s (especially since 1979). Based on the structural composition and evolution of major geological-tectonic events in each stage during the geological history in the Tibetan Plateau, this paper reviews the significant basic geological research of the Tibetan Plateau in the past 40 years. We systematically summarize the Cenozoic uplift process, collisional effects, and a series of important new discoveries, progress and achievements in the Eastern Tethys. In addition, based on the shortages of previous field investigation, data analysis, and regional evolution model, together with the unresolved conceptual questions, and the key basic geological scientific problems, we discuss the future direction of research in this region.

Key words: Qinghai-Tibetan Plateau; Cenozoic geological structure; collisional effects; multi island arc-basin structure; Tethys evolution

0 引言

本文应《沉积与特提斯地质》编辑部邀约,为隆重庆祝中国地质调查局成都地质调查中心(成都地质矿产研究所)成立六十周年。我们主要梳理与总结青藏高原地质研究团队在基础地质调查研究中的主要进展,并展望青藏高原地质研究未来发展。

1 青藏高原地质研究机遇

青藏高原面积约 $260 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全球大陆、大陆架和大陆坡面积总和的 1% 左右;高原地壳厚度一般达 60 ~ 70 km, 约占地球半径 6378 km 的 1%;自特提斯洋在青藏高原地区消亡至今, 45 Ma 以来的青藏高原巨厚地壳形成历史, 仅仅是地球 45 亿年演化历史长河中短暂的一瞬, 只占地球历史的 1%。虽然这些特征迄今还不甚了解, 但不会是偶然的巧合, 而可能是受全球构造运动的规律支配。正是这些重要特性, 成为牵动许多地质、地球物理学家的心弦之谜。为什么青藏高原拔地而起? 青藏高原地壳经历了哪些复杂的地质构造演化? 地壳结构独特性表现在哪里? 是什么力量导致地壳发生如此大规模的隆升? 为什么说亚洲气候环境的变化起源于青藏高原的形成? 等等。揭开这些谜底, 不仅有助于解决亚洲乃至全球重大的地球科学理论问题, 而且对于青藏高原地区的矿产资源勘查开发、气候环境变化评价和重大工程建设等都具有重大实际意义。

我国政府和有关地质部门十分重视青藏高原地质调查研究工作。1950 年以李璞为首随军入藏的地质工作队, 在东起金沙江, 西至喜马拉雅定日及班戈错, 南至波密河谷及雅鲁藏布江东段, 北至

丁青及聂隆宗等广大区域, 在地层、古生物、变质岩、岩浆岩、构造等方面, 进行了开创性的多学科地质工作。中科院进行三次科学考察(1973—1980, 1981—1986, 1987—1992), 地质矿产部所属省局地质队 60—70 年代对区内的基性—超基性岩带及铬铁矿的地质勘查, 川西南水北调基础地质调查及柴达木、西藏石油普查和区域地质矿产调查。70 年代后各省(区)完成了玉树、温泉、昌都幅等 1:100 万区域地质调查。

20 世纪 80 年代, 地质矿产部青藏高原地质研究所(1983 年并入成都地质矿产研究所), 组织部属院校、研究所、地勘局共计 18 个分队, 实施完成“青藏高原形成演化及重要矿产资源分布规律”调查项目, 编制出版了 1:150 万青藏高原地质图(1980、1988)。与此同时, 区内各省(区)地勘局完成青藏高原东部祁连山、西秦岭、川西、藏东及昆仑等一些地区 1:20 万和全区 1:100 万区域地质调查, 并编纂出版了分省(自治区)区域地质志。地质矿产部和中国科学院等所属单位在“三江”、松潘—甘孜、喀喇昆仑、柴达木盆地等开展了较深入地质矿产调查研究, 进行了亚东—格尔木、黑水—花石峡—当金山口和阿里地区以大当量爆破地震为主的地学研究。1980 年以来, 先后实施了一系列中外合作项目, 包括中—法喜马拉雅地质构造合作研究、中—英合作青藏高原综合地质考察、中—法喀喇昆仑合作研究、中—德雅鲁藏布喜马拉雅沉积地质合作研究、中—美龙门山—滇中 GPS 测量、中—德—意合作喜马拉雅及青藏高原大地水准测量、中—美喜马拉雅高原深地震反射试验合作研究等, 取得了一系列成果, 提出了青藏高原新生代地质、特提斯大地构造形成演化、高原隆升阶段和动力学机制等多

种假说、模式(刘增乾等,1980;刘增乾等,1990;黄汲清和陈炳蔚,1987;常承法和郑锡谟,1973;常承法,1980;Stöcklin,1989;滕吉文等,1980;滕吉文,2006;王鸿祯,1979;肖序常等,1988;刘本培,1991;刘本培等,1993;Hsü et al., 1995;潘桂棠等,1990、1997;钟大赉,1998;潘裕生等,2000;孙鸿烈和郑度,1998)。

2000—2010 年国家启动了“新一轮国土资源大调查”,开展覆盖青藏高原全区的 177 幅 1:25 万区域地质填图,并同步组织实施“青藏高原基础地质调查成果集成和综合研究”项目。这是一项开创了人类地质工作历史的伟大壮举,美国前地质学会主席伯奇费尔(Burchfiel)院士举起双手说:“中国政府的这一决策非常了不起!”项目实施取得了海量新资料 and 一系列丰硕成果(李廷栋,2006;李廷栋等,2013;李兴振等,1995;侯增谦等,2003,2004,2006,2008;殷鸿福和张克信,1997;莫宣学等,1993,1998,2003,2004,2006;莫宣学,2020;罗建宁等,1992,1996;陆松年和袁桂邦,2003;陆松年等,2002,2006;潘桂棠等,1994,2001,2002,2003,2004a,2004b,2005,2006,2008,2009,2013,2015,2020;王立全等,1999,2004,2008a,2008b,2013;王根厚等,2006,2008;李光明等,2002,2004,2020;赵志丹等,2003,2006;郑来林等,2004;尹福光等,2003,2011;周肃等,2004;朱弟成等,2003,2004,2006;廖忠礼等,2003,2006a,2006;张克信等,2001,2004,2010,2013;袁四化等,2009a,2009b;张智勇等,2004;朱同兴等,1999,2002,2006;王国灿等,1997,1999;李文昌等,2010;李荣社等,2004,2008;陈智梁等,1994;丁林等,1995;丁林和来庆洲,2003;冯益民和何世平,1995;李才,2006,2008b;李才等,2008a;江新胜等,1996,2003;耿全如等,2000,2004,2005,2006,2007,2011;冯庆来和刘本培,1993,2002),打下了青藏高原地质理论创新的坚实基础。

2 青藏高原新生代构造及陆陆碰撞过程与效应

2.1 青藏高原隆升项目实施基本情况

“青藏高原新生代构造特征及高原形成关系”是作者承担“青藏高原地调科学考察”中的二级课题研究任务。相关工作区域,东起青藏高原东部边缘龙门山—锦屏山逆冲推覆构造带,西到帕米尔构造结,北起阿尔金山—祁连山及河西走廊盆地,南抵喜马拉雅山及其南麓。前后历时六年有余,穿越

六条大剖面,总计行程八万多公里。研究工作中,从野外地质调查取得的第一手资料入手,参阅、借鉴前人的有关工作成果,采用比较构造学的研究方法,力求全方位、多角度、多层次地进行探索。1987 年初完成报告撰写,由马杏垣院士为主审的评审专家组,审议认为该成果是青藏高原地质研究的一项开创性成果,并建议定名为《青藏高原新生代构造演化》,1990 年由地质出版社出版。

在此基础上,20 世纪 90 年代作者又参与李廷栋院士负责实施的原地质矿产部重点科技项目“青藏高原隆升的地质记录及机制”,综合研究青藏高原陆—陆碰撞过程和效应,为探讨青藏高原的隆升过程和形成机制提供多方面的地质依据。在长达 5 年的研究期间里,尽管高原地区自然地理条件十分恶劣,生活条件十分艰苦,高山深谷,悬崖陡壁,森林密布,冰川纵横。课题组仍冒着生命危险开展工作,尤其是 1997 年里连续两个月与外界失去联系,坚持在野外第一线,徒步考察追索雅鲁藏布大峡谷 800 多千米,可以说测制的每一条地质构造剖面,搜集的每一块标本,获得的每一张照片都是十分珍贵的。由于“大峡谷”自然地理、交通条件的限制,仅几条考察路线尚不可能揭示区域地质构造全貌。因此,为强化这一碰撞构造典型区的地质研究工作,在中国地质调查局的支持下,1999 年部署了该区 1:25 万区域地质填图,课题组主要成员即为墨脱幅填图负责人或技术骨干,将科学研究与区域地质调查工作密切结合起来。在项目组全体人员的共同努力下,碰撞构造典型区域——南迦巴瓦地区的解剖研究取得了丰硕成果。

在课题实施过程中,有的研究人员同时承担了青藏高原东部 GPS 监测与碰撞后地壳形变研究,有的承担了“三江”地区地质构造与成矿作用的研究,有的承担了喜马拉雅—冈底斯地区碰撞构造成矿和资源评价的研究。期间,还组织了本单位中青年业务骨干横穿青藏高原南北向(柴北缘—格尔木—拉萨—聂拉木)和东西向(措勤—拉萨—波密—成都)地质路线大考察,分别参加了尼泊尔、中国成都、瑞士等 HKT 国际研讨会,并实地考察了印度德干高原、泰国北部造山带、科迪勒拉造山带及阿尔卑斯造山带,使研究团队的视觉拓展到从全球背景来认识理解青藏高原的形成演化。

2.2 调查研究主要进展

2.2.1 提出高原地貌划分的新方案

李吉均等(1983)详细地阐述了青藏高原地貌

的基本轮廓。我们根据高原地貌发育的新生代地质构造背景、各大山系及水系受动力机制的差异,以及塑造高原表面形态外部营力因素(太平洋水系、印度洋水系及内陆河湖水系)的切割强度,造成青藏高原内部各区域的差异。将青藏高原划分为三个二级地貌区:①北部山原盆地区,即内陆水系地貌区;②东部平行岭谷山地区,即太平洋水系地貌区;③西南部高山深谷区,即印度洋水系地貌区。

揭示出青藏高原地貌的三大主要特征:①断裂作用是青藏高原新构造运动最主要表现形式,各大山脉造山形式与断裂活动方式、组合形式密切相关,大江大河其成因多属断裂河谷,西藏高原内陆湖泊的定向定位、形态变位均与断裂密切相关。②现代高原的面貌具三层结构:最高的山顶面,普通海拔 5800 ~ 6000m;山原面,在西藏高原平均海拔 5200 ~ 5500m;内陆盐湖的盆地,以班公湖 - 东巧为中轴,高程 4400 ~ 4600m,向南、向北递次抬高达 5000m。③河流水系是塑造高原地貌的外动力,水系源自高原,既不断向源侵蚀,又不断背离高原而流,我们称其为外动力作用的双向逆反运动(潘桂棠等,1990)。

2.2.2 揭示出高原新生代三大类构造盆地

青藏高原及邻区新生代构造盆地特别发育,面积 > 104km² 的就有 30 多个。这些盆地奠基于不同性质的地质构造单元之上,处于不同的大地构造部位,因而其构造特征、沉积岩相组合类型及发育历史都各不相同。除青藏高原西部及南部残存有一套古一始新统特提斯残留海盆地,并作为印度 - 亚洲大陆白垩纪末碰撞重要标志的海相沉积区以外,其余大部区域展布古近纪到新近纪陆相环境下的构造盆地,依据碰撞构造动力学背景将青藏高原碰撞隆升过程的构造盆地划分为三大类:压陷盆地(即挠曲盆地)、裂陷盆地和走滑拉分盆地。

(1) 压陷盆地(挠曲盆地)

压陷盆地(挠曲盆地)是指在碰撞后陆内汇聚、造山链抬升和挤压逆冲构造变形过程中,使盆地基底向山链方向挠曲下沉的构造拗陷。新生代以来,在青藏高原周边和内部发育了一系列压陷盆地。在高原北部边缘有西昆仑隆升对应的莎车盆地(塔里木南缘),祁连山向北逆冲对应的河西走廊盆地(包括玉门盆地、酒泉盆地、张掖盆地和武威盆地)。在高原南部边缘喜马拉雅山前恒河压陷盆地,高原内部的柴达木盆地、共和盆地和西宁盆地、贵德盆

地、循化盆地等(潘桂棠等,1990,2013)。

依据高原周边和内部十多个大型压陷盆地的综合集成研究,大体可看出下列几大特征:①压陷盆地的基底性质常为刚性克拉通基底或裂离地块基底,盆地展布方向常与山链走向一致,长度比宽度大一个数量级。②盆地在横剖面上具明显的不对称性,盆地基底向山链方向呈箕状下陷,沉积体也相应呈楔状体,由于边界断裂冲断序列、活动强度和方式的不同,可以出现各种形式的剖面结构。③所有压陷盆地均为河湖相碎屑岩沉积和磨拉石沉积;④盆地内发育不对称的线性褶皱,背斜较紧密并向山外倒转,伴生逆冲断层发育于背斜倒转翼,近山链一侧变形强烈,近稳定地块一侧变形减弱;离山链愈远,褶皱愈平缓,且趋于消失;逆掩断层带下是探寻古油气藏很有利的场所。⑤高原内部压陷盆地是经受汇聚与走滑的联合作用造成的;柴达木盆地的发生、发展除了受柴达木盆地北缘逆掩断层带和昆仑山北缘逆冲断层带控制外,还受到阿尔金左旋走滑断层及盆内 NE 和 NWW 向两组高角度断层的制约;总体表现为南北对冲式压陷,同时形成先西后东,使沉陷中心东移;渐新世 - 中新世时的沉降中心在盆地西南缘尕斯断陷内,上新世的沉降中心在盆地向东迁移至茫崖、一里坪一带,更新世时沉降中心继续东迁到三湖一带(台吉乃尔湖、达布逊河、霍布孙河地区)。⑥高原周边及内部压陷盆地内,没有发现有新生代的火山岩浆活动。

(2) 裂陷盆地

第三纪裂陷盆地的构造形式、展布、组合类型,在不同的大地构造部位和基底有不同的特征,但控制盆地形成和发展的盆缘正断层仍是最基本的构造特征。尽管一些盆地边缘现今所见压性或剪切断裂,以及某些盆地内存在褶皱构造,均是盆地形成后的产物。

裂陷盆地具有下列几大特征:①盆地展布受先存基底的软弱带,特别是东西向结合带转化为新构造活动带控制,如雅鲁藏布江带和班公湖 - 怒江带,在渐新世到中新世期间,大规模正断层发生,控制着一系列断陷盆地的分布,具有窄长外形、单断箕状或双断地堑的构造轮廓,以伦坡拉盆地与其南北毗邻的班戈盆地和伦北盆地较为典型。所以,沿两大结合带并非全线形成大规模的狭长裂谷,而主要呈串珠状湖盆沉积体系的地堑式展布,宽度一般 > 10 km,长度一般 > 100 km。②由于发育的大地构

造环境不同,高原区裂陷盆地常见有不同的结构类型,雅鲁藏布江结合带发育以罗布莎、柳区、大竹卡等盆地为代表的箕状断陷;冈底斯岛弧带发育以措勤盆地为代表的坳陷地垒式构造;藏北羌塘地区则沿 NEE—NWW 或近 E—W 向断裂发育一系列半地堑群;盆地内主要充填着渐新世—中新世的河湖相沉积物,在半地堑中一侧以正断层为边界,活动断层一侧分布着碎屑沉积。③渐新世—中新世期间,高原区所有裂陷盆地均为表壳伸展运动所造成,掀斜作用主要发生于冈底斯和藏北羌塘两大掀斜区段,在藏北掀斜区段,一系列半地堑和次生断块的形成,犹如多米诺骨牌掀斜,并表现为北断南超的“断超规律”。④盆地演化通常经历了初始褶断裂陷期→裂陷扩展沉降期→萎缩封闭期一个完整的裂陷旋回,渐新世初开始形成,渐新世中期到中新世裂陷、强烈沉降,中新世末盆地萎缩封闭;与构造样式的发展序列相协调,盆地内沉积岩相组合也随时间的发展,从冲积扇沉积→深湖→浅湖含盐沉积的变化。⑤挤压构造是盆地萎缩封闭的一个重要标志(马杏垣,1987),青藏高原裂陷盆地的盆缘断裂在后期基本上都转化为盆缘逆冲构造,盆内的生长断层转化为斜冲构造,并伴有宽缓褶皱,甚至局部倒转。⑥伴随裂陷伸展运动,高原区绝大多数裂陷盆地内的火山活动比较频繁,并且主要为中酸性岩浆喷发;有的盆地中还发育玄武岩流和岩墙,如冈底斯带狮泉河盆地、措勤盆地。

(3) 走滑拉分盆地

走滑拉分盆地是走滑断裂构造系统中一种重要构造形式,是走滑断裂两侧地质体左旋或右旋滑移而引起的斜向张裂作用而引发产生的构造凹陷。在整个青藏高原地区,由于印度板块与亚洲大陆碰撞,陆内汇聚,整体处于挤压构造背景,而三江横断山构造带表现为独特大规模走滑转换构造环境。在此走滑转换应变场中,沿先存的怒江结合带中出现洛隆、马利、丁青、八宿等走滑拉盆地,沿澜沧江结合带及分枝断裂带出现吉曲、食宿站、囊谦等走滑拉分盆地;沿孜嘎寺—德钦断裂的贡觉、莽错等地发育走滑拉分盆地,沿甘孜—理塘结合带发育木拉、热鲁等走滑拉分盆地。

走滑拉分盆地具有下列几大特征:①拉分盆地群及单个盆地,均呈近 SN 向、NWW 向展布,明显受先存基底断裂软弱带控制;盆缘断裂与盆外主干断裂相接,发育的盆地大小不一,长宽不等,通常所见

呈“S”型(如八宿、洛隆盆地)、不规则菱形(如囊谦、贡觉盆地);在横断山西部发育的盆地规模大,一般长几十千米,宽几千米;在横断山带东部如川西地区的盆地规模较小,一般长几千米,宽几百米。以囊谦盆地为例,长 55km,最宽达 18km,与世界其他地区的走滑拉分盆地长宽比例近似于 3 的比率相当;但多数盆地长宽比率偏大,原因可能是与横断山带在中新世以来受强烈的斜向挤压变形的改造有关;沉积厚大的部位往往都在盆地东侧,即近盆缘走滑断层一侧;河流冲积扇、塌积泥石流常沿盆缘断裂分布,有的因断裂的滑移而离源区;同时,由于断块抬升作用,垂向运动不均一,盆地底面倾斜,使得盆地中沉积物在横剖面上表现为不对称性;盆地的前新生代基底东深西浅,发育中堑的裂陷。②伴随走滑拉裂活动,在拉分盆地内发育有各类火山岩浆喷发或溢流,始新世的火山岩浆活动主要沿盆缘主干走滑断层出露;主要为钙碱性—偏碱系列,粗面玄武岩—流纹岩组合;盆地内的玄武岩类及粗面岩—红层—膏盐的建造组合基本上可以与大陆裂谷的建造组合相对比,盆地萎缩期有斑岩、粗面岩、浅成侵入岩等火山喷发活动。③在横断山走滑拉张位移场内,与始新世—渐新世贡觉等拉分盆地形成同步,在相邻的西侧隆起带上,形成了以玉龙斑岩体为代表的斑岩带,纵向长达 500km 以上,宽约 20km。④横断山拉分盆地群内的沉积层,由于中新世以来的新构造作用受到掀斜和褶皱变形,盆缘断裂间的旋转作用引起扭动构造;在八宿瓦达沟—上林卡、贡觉、囊谦等盆地中,均可见在平面上呈左行雁列式的褶皱轴,轴向 NW310°,与盆缘主干大断裂呈 15°~20°的交角,指示盆地东侧地质体顺时针扭动的运动特征;在横剖面上一般表现为一个半波幅的褶皱系列,背斜北东翼地层产状缓,西南翼产状陡,向斜北东翼产状陡,南西翼产状缓;一般为歪斜圆滑褶曲,近断裂处可见尖棱褶曲。⑤横断山古近纪拉分盆地的萎缩封闭,主要是通过斜向拉伸转化为斜向挤压实现的;渐新世末—中新世的构造运动,在横断山地区总的表现为汇聚逆冲作用及地块体之间的斜向滑移;在所有盆地的盆缘断裂,现今均显示为强烈的逆冲作用造成的斜冲断层,甚至逆掩断层;同时,褶皱作用的特点,可说明兼有剪切力偶作用;盆地内部发育一系列 NWW 向左旋的共轭剪切断层,尤其是 NWW 向左旋剪切断层和主断层带相交,而将盆地分割成若干块段;由

于边缘断裂的斜向挤压滑移的持续发展,有的盆地(如贡觉盆地)可能原始是菱形的,而形成宽而窄的盆地,长度10倍于宽度。

2.2.3 构建了碰撞过程侵入岩浆活动的时空格架

印度-欧亚大陆碰撞过程中,岩浆活动在不同地质构造单元中的特征及其分布差异很大,研究碰撞过程的岩浆活动特征及其时空分布、壳-幔混合型岩浆侵入或喷发活动等各种信息(包括源区物质的化学与温度、压力等物理化学信息),是解决青藏高原岩石圈动力学演化的重要途径之一,对了解下地壳和上地幔的物质组成、形成过程、演变历史、深部地质作用以及探讨高原隆升机制等方面,都具有重要意义。

(1) 青藏高原南部侵入岩带

在青藏高原南部的冈底斯-喜马拉雅碰撞造山带可划分出三个岩带,即冈底斯岩带、拉轨岗日岩带和高喜马拉雅岩带(廖忠礼等,2003)。

①冈底斯岩带:主体部分为闪长岩、花岗闪长岩和斑状黑云母花岗岩,其次为黑云母花岗岩和二云母花岗等,其年龄值为65~40Ma。花岗闪长岩、石英闪长岩和石英二长岩中,含有占岩体体积2%~5%的深色微粒岩包体(绝大多数为幔源岩石包体)。常量、微量、稀土元素地球化学特征表明其形成于俯冲环境,Sr-Nd同位素地球化学表明地幔物质与热量对花岗岩浆的形成有重要影响,据二端元混合模型计算,地幔物质对花岗岩同位素的贡献达70%。这一时期的中酸性侵入岩主要是在新特提斯闭合,雅鲁藏布江洋板块向北俯冲消减的构造背景下产生,俯冲洋壳与地幔物质对岩浆的形成有重要贡献。

冈底斯岩带中含斑岩体受控于近东西向的大型韧性剪切带与南北向或北东向构造交切部位,呈串珠状的岩珠产出,斑岩体面积1~2km²,个别达11km²,主要岩石类型有石英二长斑岩、黑云母二长斑岩、二长花岗斑岩和花岗闪长斑岩。随着2000—2006年地质矿产大调查工作的不断深入,揭示出冈底斯斑岩带是一个世界级规模的斑岩铜矿带,有十多个斑岩铜矿床具大型规模,成矿斑岩的年龄值为22.2~16Ma。斑岩属钾玄岩-高钾钙碱性系列,岩石以富集大离子亲石元素Rb、Ba、Th、Sr,亏损高场强元素Nb、Ta、Ti等特点;稀土总量较高,轻重稀土元素分异明显,缺乏明显的Eu异常, $\delta^{34}\text{S}$ 为0.89%~1.89%,变化范围小,具幔源硫的组成特征,显示

出上地幔或壳幔混合源区的局部熔融特征。

②拉轨岗日岩带:计有18个岩体,岩性主要是片麻状二云母二长花岗岩,年龄值为55~50Ma。其次为二云母正长花岗岩,年龄值为13~6Ma。东段拉轨岗日、康马等10个岩体侵位于变质核杂岩,西段镇作、佩古错等8个岩体表现为热穹隆。

③高喜马拉雅岩带:岩性较单一,主要为电气石白云母花岗岩、二云母花岗岩等,年龄值为20~10Ma。这一时期的岩浆岩主要是具有明显壳源特征的花岗岩,错那洞、拉隆等高分异岩体侵位出露于藏南拆离系上盘构造穹隆中和下盘的片麻岩中,在不同的构造部位的地质填图,没有观测到淡色花岗岩体切断藏南拆离系。喜马拉雅岩带有望成为我国未来重要的Be-Li-Nb-Ta稀有金属资源基地(吴福元等,2015,2020)

(2) 三江造山带及高原东部侵入岩带

在三江造山带及高原东部边缘梳理出新生代三个岩浆岩带,即藏东玉龙-芒康斑岩带、盐源-木里幔源碱性岩带、折多山-贡嘎山壳源花岗岩带。

①玉龙-芒康斑岩带:北起青海日胆果、夏日多,中段玉龙、莽总、多霞松多、马拉松多,南至芒康,数十个斑岩构成长达300km的斑岩带,又可进一步分为东带玉龙-马拉松多花岗斑岩带,西带日通-马牧普正长斑岩带。同位素年龄集中在52~37Ma,始于60Ma的印-亚大陆碰撞,在斜交或直交的藏东-三江地区,当印度克拉通向北碰撞汇聚、扬子克拉通侧向围阻,出现近南北向巨大剪切应变,构成三江断裂系的车所断裂、温泉断裂等均在古近纪发生大规模右旋走滑作用,产生一系列NW向斜列褶皱,其核部为纵张断裂,控制了玉龙斑岩带各斑岩体的侵位空间和展布特征。走滑断裂既是诱发地幔源区部分熔融的超壳断裂,又是疏导源区岩浆熔体向上运移侵位的通道。大地构造位置上,该斑岩带处于受金沙江洋壳(C-T₂)向西俯冲形成的江达-德钦陆缘弧与昌都前陆盆地之间的转换部位,含矿斑岩普遍发育电气石-石英质角砾岩,斑岩岩浆极度高硼,斑岩岩浆并没有受到地壳物质混染,硼的来源可被解释为富含沉积物的洋壳,侯增谦等(2003)把玉龙斑岩带成岩模式总结为洋壳俯冲“岛弧型”源岩+岩石圈走滑断裂联合作用成岩模式。

②锦屏山-盐源-木里幔源碱性岩带:碱性岩带的岩石组合主要为钾质煌斑岩类和霓辉正长岩

等碱性杂岩。锦屏山—玉龙雪山地区 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的范围内共发现钾质煌斑岩体群 8 个,总计有 366 个岩体,其年龄在 40 ~ 30Ma,主要受控于盐源—丽江逆冲推覆构造带前缘。碱性杂岩主要由霓辉正长岩和霓辉伟晶岩构成,多呈小岩株、岩体产出,碳酸岩则呈脉状和网脉状分布于正长岩体内部和边部。产出大量氟碳铈矿,构成以牦牛坪—里庄内生大型稀土金属矿带。含稀土矿碱性杂岩侵位于锦屏山前陆逆冲推覆带前缘菁河断裂两侧次级张扭性破裂面之中,大致呈南北向弧形转南向西向串珠状展布。

③折多山—贡嘎山同构造壳源花岗岩带:左旋走滑陡倾深延的鲜水河剪切带,错断龙门山—锦屏山大陆边缘造山带,不仅为花岗岩浆作用提供通道,也是地壳部分熔融产生的花岗岩浆的构造因素。其表现为走滑剪切构造环境形成的同构造壳源花岗岩,形成了折多山—贡嘎山花岗岩带,长达 150km,宽 6 ~ 8km。岩体侵入主体是三叠系西康群浅变质碎屑岩,岩带东西两侧与围岩主体为断层接触,仅局部地段可见侵入接触关系。岩石组合主要为黑云母花岗岩、黑云二长花岗岩,局部可见中生代的花岗闪长岩、斜长花岗岩及石英闪长岩的“包体”或捕虏体。岩体边缘发育宽数百米至千余米的糜棱岩,岩石地球化学显示其兼具“T”型和“S”型双重特性,主要为中上地壳经不同程度的部分熔融而形成。

2.2.4 青藏高原新生代后碰撞及陆内汇聚背景下强烈火山活动

岩浆岩是探测和认识地球壳幔深部的探针和“窗口”(莫宣学等, 2004, 2011, 2019; Zhu et al., 2005, 2008a, 2008b, 2010; Hou et al., 2007),对青藏高原新生代火山岩的研究,对认识高原区巨厚地壳形成、地幔物质侧向流动具有重大意义。根据火山活动与构造关系及大地构造部位,将高原区新生代火山岩划分为冈底斯火山岩带、羌塘火山岩带、可可西里火山岩带及剑川—大理火山岩带、西和—礼县火山岩区、红柳峡火山岩区和卡拉库姆火山岩区。

(1) 冈底斯火山岩带

位于雅鲁藏布江结合带北侧,东西向展布达 1500km,其中部出露宽达 200km,其主要层位是在古—始新统林子宗火山,岩石类型主要由安山岩、流纹岩和中酸性火山岩,时限为 64 ~ 38Ma,与雅鲁藏布江洋向北俯冲相关(潘桂棠等, 1990; 莫宣学等, 2003; 董国臣, 2002)。渐新统一中新统大竹卡组和新统乌郁群主要

主要为粗面岩、粗面安山岩、玄武岩、流纹岩英安质凝灰岩及火山角砾岩,火山活动年龄值为 17.5 ~ 10Ma (赵志丹等, 2003)。

冈底斯火山岩带的不同部位在中新世都发生火山活动,可能与中新世高原隆升期地壳加厚、俯冲板片拆沉、壳幔部分熔融、物质上涌密切相关,但冈底斯西段狮泉河—革吉一带中新世火山岩活动时代为 20 ~ 16Ma,而中段活动时代 13 ~ 9Ma,中段比西段滞后了 7Ma,可能反映西—中段地壳加厚的时间差。

(2) 羌塘火山岩带

新生代火山活动持续时间最长,岩石系列齐全,大致以龙木错—双湖缝合带为界,分为北羌塘火山岩亚带和南羌塘火山岩亚带。

南羌塘火山岩带,包括鱼鳞山、纳丁错、拉嘎拉、走沟油茶沟、康托等地的火山岩。鱼鳞山岩区主要岩石类型为白榴斑岩、响岩、霓霞粗面岩等,为中等规模的熔岩被,不整合在侏罗—白垩系及古近系之上,年龄为 30 ~ 18Ma。而纳丁错、走沟油茶沟岩区主要岩石类型为安山岩、英安岩、流纹岩、火山碎屑岩和高钾钙碱性安山岩—粗安岩,其年龄为 30 ~ 18Ma (迟效国等, 1999; 丁林等, 1999, 2000)。

北羌塘火山岩亚带,包括巴毛穷宗岩区、多格错仁岩区、太平湖—波涛湖岩区、武青山—黑虎岭岩区等地,均为中或大型熔岩被,主要岩石类型为粗面玄武岩、辉石安山岩、粗面安山岩、霞石碧玄岩、白榴碱玄岩,一般厚度达几百米;向东到祖尔肯乌拉山一带,熔岩和火山碎屑岩交替韵律发育,厚度增加到 1000m 以上,该亚带火山岩年龄为 40 ~ 32Ma (迟效国等, 1999; 谭富文等, 2000a, 2000b)。

(3) 可可西里火山岩带

沿南昆仑结合带和金沙江结合带之间的可可西里地区分布大量的新生代火山岩,东西长达 1000km,宽约 60km,自西向东可见有羊湖、强巴欠、三角波错、鲸鱼湖—雄英台、向阳湖、黑驼峰、五雪峰、可考湖及大帽山等火山岩区,主要岩石类型为安山质熔岩、粗面安山岩、石英透长石熔结凝灰岩、白榴石玄武岩、粗安岩和粗面岩及安山质熔结凝灰岩、杂色火山角砾岩等。火山熔岩以熔岩流、熔岩高地、熔岩台地覆盖在三叠系或第三纪红层之上,野外在强巴欠火山岩区可见火山熔岩流自北向南流动的遗迹,在鲸鱼湖可见暗紫色熔岩发育柱状节

理,在黑驼峰岩区北西西向熔岩高地西段可见粗安质火山锥,在大帽山岩区的粗面岩、英安质凝灰熔岩中还发现刚玉、尖晶石和麻粒岩捕虏体(邓万明等,1988)。该火山岩带年龄为 $18.5 \sim 8\text{Ma}$ (邓万明等,1989,1998)。朱弟成等(2013)指出该带火山岩具有东西两段早、中段新的特点,东段大帽山—五雪峰火山活动在 $20 \sim 15\text{Ma}$,西段羊湖—强巴欠火山活动集中在 15Ma ,中段黑驼峰—向阳湖火山岩活动在 $12 \sim 10\text{Ma}$,涌波错发生于 9.4Ma 后期,还叠加上新世 5Ma 火山活动。

(4)青藏高原周边各大构造带交接部位,新生代幔源火山岩浆活动

青藏高原新生代整体处于陆内汇聚的构造背景下,不仅发生强烈的构造变形和火山岩浆活动,而且在周边各古老造带的深层次交接部位均有幔源火山喷发活动。

①龙门山—锦屏山—玉龙雪山北东向构造带与南北横断山构造带交汇部位的云南剑川、大理海东地区,有上新世(N_2)粗面岩—白榴岩碱性玄武岩—玄武质角砾熔岩凝灰岩等喷溢,在大寺箐剖面上可见 600 多米火山岩分布。

②北东向龙门山构造与东西向秦岭构造带交汇部位的甘肃西和—礼县白关地区,有中新世早期(N_1)的超镁质玻基白榴橄辉岩类及火山碎屑岩喷发。大小不等的火山岩体均分布在 2700m 左右的山顶夷平面上,十分壮观。在水晶坝白榴方沸橄辉岩测得 K-Ar 稀释法年龄 $14.2 \pm 0.5\text{Ma}$,与同时代地层及古生物相一致,指示为中新世。

③北西西向祁连山构造带与北东向阿尔金山构造带交接部位的玉门红柳峡、旱峡地区,有上新世—第四纪粗面玄武岩、橄榄玄武岩溢流,以火山颈熔岩流和岩被形式穿切并覆盖在白垩—古近纪—中新世陆相砂泥岩之上。当年,我们徒手攀爬上 150m 悬崖峭壁的红柳峡火山颈(图 1),可见其长轴为 NE 向,长约 280m;短轴 NWW 向,宽约 160m,岩颈南约 200m 出现熔岩被,70m 厚的岩流自北西向南东斜流,倾角约 30° 。

④北东向阿尔金山构造带与近东西向西昆仑构造带的斜切部位,有新疆泉水河、阿什库勒、大红柳滩的第四纪碱性粗面岩溢流。大红柳滩火山岩出露于新藏公路 506 公里碑滚石河南岸阶地砾石层上,下部为厚 1~2m 的火山角砾岩(有约 10cm 长的椭圆形火山弹),其上为辉石粗面岩和安粗岩厚

约 10m,上覆为全新世河床砾石层,在泉水沟可见厚约 100m 的橄榄玄武岩、安山玄武岩类三期喷发—溢流和凝灰质砂砾岩夹层,这些熔岩被均沿康西瓦向南凸出的弧形断裂带呈北西向展布。向东阿尔金山断裂与康西瓦断裂叠接部位的阿什库勒火山岩区,大规模幔源高钾玄武岩类熔岩流溢出覆盖面积达 200km^2 。这一中更新世火山群地貌景观特征十分壮观,可见集中分布 7 个完整的火山口,是青藏高原乃至全球年轻火山岩出露海拔最高处(海拔 6000m),也是我国最新火山喷发区(1951 年 5 月 27 日)。



图 1 红柳峡火山颈野外露头(1982 年 6 月)

Fig. 1 Outcrop of volcanic neck in Hongliuxia (in June 1982)

2.2.5 碰撞过程构造变形研究进展

喜马拉雅造山带不是特提斯洋壳消亡沿俯冲带产生的褶皱山脉,而是印度板块被动陆缘变质基底及显生宙沉积盖层的卷入、地壳缩短变厚的大陆边缘碰撞造山带。最新调查揭示喜马拉雅造山带内主要动力边界带的形成时间,愈向印度克拉通方向其形成时代愈新,即特提斯喜马拉雅逆冲带(THS)(相当于定日—冈巴断裂)形成于 $31 \sim 17\text{Ma}$;藏南拆离系(STDS)形成于 $21 \sim 12\text{Ma}$;主中央逆冲带(MCT)形成于 $22 \sim 10\text{Ma}$;主边界逆冲带(MBT)形成于 11Ma ;主前缘冲断层开始于 $2.1 \sim 1.6\text{Ma}$ 。喜马拉雅造山过程地壳缩短达 680km。

位于帕米尔构造结东翼的喀喇昆仑—噶尔曲右旋走滑断层系长达 1000km,依据阿克泰拜尔缝合带与班公湖缝合带的位移特征,右旋平移断距达 450km。最新研究表明,北段向北帕米尔过渡为向北的卡拉库姆湖—瓦赫特逆掩断裂,在其两侧有同步发育的公格尔—慕士塔格伸展系统和塔什库尔干走滑拉分盆地(N_2-Q_1);在南段过渡为雅鲁藏布

逆冲断层,并在其两侧发育扎达走滑拉分盆地(N_1-Q_1)和纳木那尼伸展系统的形成;在狮泉河地区,扎西岗村可见断层西盘的花岗岩高角度冲断在湖相层(N_2-Q)上。

横断山构造结的构造变形,表现为以昌都-兰坪-思茅盆地为中轴的不对称走滑-对冲构造的形成、走滑拉分盆地的发育,以及深源高位浅成斑岩的定位及其成矿,均形成于古近纪(50~35 Ma)。青藏高原东部边缘的龙门山-锦屏山逆冲推覆带,不仅在彭县白水河主中央断裂带上可见长达12km的推覆体,在天全向斜翼部还可见其压盖到白垩纪-古近纪连续沉积的地层之上,显示其主要形成于中新世。

对碰撞过程同步发生的伸展构造系统研究,是造山带研究中的重要课题。喜马拉雅大陆边缘碰撞造山带中新世以来形成的东西向藏南拆离系、变质核杂岩穹隆带是最能激发研究者新思想的变形构造。藏南拆离系基本特征:①韧性剪切及正断层使显生宙岩层叠覆在前寒武纪变质岩系之上,形成宽达0.2~4 km 糜棱岩带(相当于肉切村岩群);②东西长达2000 km 以上,东延到米林地区,西延到扎斯卡地区,均叠接在雅鲁藏布结合带内,存在斜向滑动的伸展构造置换作用的清楚证据;③拆离系形成时间为22~14 Ma;④存在多次的正向置换作用、右旋或左旋剪切置换作用等滑移事件,有证据表明可能有7.5~20km厚度的地壳被断失;⑤藏南拆离系上盘盖层向北的正向滑动,与高喜马拉雅结晶变质岩系底界向南逆冲的主中央断层系同步运动,显示了地壳楔状体相对向南垂向挤出的动力学特征。

西藏高原发育的南北向地堑-裂谷系、盆地中最老的沉积物是中新世晚期,已有的同位素年代学获得南北向的同沉积正断层形成于14~8 Ma。据GPS测量计算,在拉萨与狮泉河之间的东西向伸展拉张速率为 (16 ± 1.80) mm/a。依据与伸展作用相关高钾火山岩系的发育,揭示裂谷作用很可能涉及到壳-幔边界,但能否作为青藏高原在中新世时已到达现今海拔高度的依据,尚需进一步地研究。

对碰撞汇聚时应力最为集中的南迦巴瓦地区开展专题填图与详细解剖,确定雅鲁藏布缝合带在南迦巴瓦地区的空间展布、物质组成及结构构造,厘定蛇绿混杂岩带大致沿雅鲁藏布江东段的大拐弯地区呈弧形分布,明确了雅鲁藏布缝合带东延的大地构造位置。

2.2.6 印度-亚洲大陆碰撞过程的成矿作用

研究表明,碰撞期也是青藏高原众多金属矿产、多种矿床类型的成矿时期。一方面表现为一批重要矿集区和大型/超大型铜、铅锌、锑、金、银矿的形成,另一方面又显示出构造热事件对早期形成的各类矿床进行不同程度的改造、定型和定位。

陆-陆碰撞过程对深部结构的挠动、物质结构的改造等机制是成矿作用的重要约束条件。将青藏高原新生代的成矿,初步划分为碰撞造山和陆内汇聚两个成矿巨系统,并进一步划分出8个主要的成矿系统,分别是同碰撞岩浆成矿系统、同碰撞火山成矿系统、逆冲推覆构造成矿系统、走滑拉分构造成矿系统、陆内深源岩浆成矿系统、陆内浅源岩浆成矿系统、伸展拆离构造成矿系统、断陷盆地成矿系统。初步揭示出冈底斯岛弧带与碰撞造山后幔源岩浆有关的斑岩型铜矿具有巨大的资源潜力,指出藏南喜马拉雅锑、金成矿带和唐古拉锑、金成矿带与伸展拆离系相伴发育的浅成低温流体密切相关,藏东斑岩铜矿带、滇西铅锌多金属矿床受陆壳缩短走滑转换作用的制约。

2.3 国际合作中热点前沿问题讨论和交流

在1994年9月20日—10月15日期间,我有幸与美国科学院和第三世界科学院院士许靖华教授、美国科学院院士麻省理工大学Molnar P(彼得·莫纳)教授及瑞士、美国、德国、英国等10位地质学家共同考察雅鲁藏布江缝合带(日喀则白朗-吉定-昂仁-萨噶-仲巴帕羊、公珠错和普兰巴嘎等)、冈仁齐峰南坡及高喜马拉雅(佩枯错-定日-聂拉木-樟木口岸友谊桥)(图2)。许靖华院士沿雅鲁藏布江缝合带考察,并讲解蛇绿混杂岩的岩石组合、基质、岩块、变形样式等基本特征,还就共同关心的几个重大热点和前沿问题进行讨论与交流,通常是莫纳院士提出问题,潘桂棠讲认识和理解,许靖华院士亲自翻译:

(1)莫纳:印度与欧亚大陆何时碰撞?是始新世碰撞吗?

潘:地质依据表明应该是白垩纪末马斯特里赫特期洋壳俯冲消减,印度与欧亚大陆汇聚碰撞。主要依据是:①雅鲁藏布江蛇绿岩的时代主要为侏罗-白垩纪,无始新世洋壳残余;②在青藏高原西部及南部仍有古-始新世特提斯残留海盆地的滨浅海沉积,在高喜马拉雅定日-岗巴的基堵拉组和宗浦群为陆棚海沉积,冈底斯山南麓的错江顶群、喀喇

昆仑山日土的欧利组、新藏公路 814 公里碑东弧山始新世扇三角洲砂砾岩中,我们发现货币虫灰岩夹层等等,这些残留海盆的沉积是印-欧大陆碰撞后的重要标志;③在冈底斯沿拉萨-羊八井公路南侧可见壮观的古近纪典中组不整合覆于晚白垩世已挤压褶皱的地层之上,等等。

(2)莫纳:这次实地考察我们认识到从萨嘎起向西雅鲁藏布蛇绿混杂岩带分支成南北两带,中间夹持仲巴地块,这是怎么形成的?

潘:解释这一地质事实,目前有三种模式:一是 Gansser A(甘塞尔)早在 60 年《喜马拉雅地质》提出的,南带是由北部俯冲碰撞带作为根带向南逆冲推覆到印度大陆边缘上的地质记录;二是仲巴地块作为滑覆体于雅鲁藏布江蛇绿混杂岩带之上,相当于薄皮板块构造模式;三是仲巴地块是新特提斯洋中的裂离地块,表现为两个分支洋盆俯冲消减带。莫纳插问:你是什么观点?我说:后一种裂离地块的分隔符合客观实际。



图2 陪同国外地质学家考察雅鲁藏布江缝合带及喜马拉雅造山带

Fig. 2 Geologists explored yarlung Zangbo suture zone and Himalayan orogenic belt

(3)莫纳:青藏高原新生代构造隆升问题在国际上是一个热门话题,中国地质学家也很关注,你们怎么看?

潘:我们已经注意到莫纳院士与学生们在七八十年代发表的“西藏高原的活动构造”、“中国的活动构造”和“亚洲新生代大地构造”等一系列文章(Molnar and Tapponier, 1975; Molnar, 1989),提出以印-亚板块碰撞滑线场理论解释了板内深部地震活动的起因,导致板块碰撞远距离效应,其影响宽度超过 1000 多千米,形成陆内宽广变形与岩浆活动

带,并使陆内早期缝合带再度活动等。这给我们很多启发,我们也认真学习了,在我国构造界有很大影响,但有的观点我们并不赞成。例如:你们认为“青藏高原在构造上像一个死带”,“西藏本身不表现为地壳缩短”,“只是将应力向北和向东传递并充当亚洲的应力标尺”等观点,是不完全符合实地考察所得到的地质事实,特别是你们提出的“逃逸构造说”,我们不能接受。

青藏高原巨厚地壳主体是由众多的裂离地块,不同时代、不同尺度的岛弧及 20 多条蛇绿混杂岩带(俯冲增生杂岩带)组成复杂的巨型特提斯造山系统,所有蛇绿混杂岩带均在青藏高原隆升过程中转化为新构造活动带、地震活动带、地热异常带。在印-亚大陆碰撞后,高原周边塔里木、华北和扬子三大克拉通沿周边逆冲推覆带向中心的陆内汇聚作用,决定了高原周边山链及内部山链的新生代构造活动特征及非对称的扇形冲断结构形式。喜马拉雅弧形山链内三条主干冲断带、西昆仑北缘冲断带、祁连山山前逆冲带、龙门山-锦屏山逆冲推覆带等,断面均毫无例外地向高原区倾斜,它们均定型于中新世到第四纪,显示了青藏高原强烈的新构造特性。

自始新世末以来,青藏高原地壳南北向大约由 2400km 缩短为现今的 1200km 左右,地壳厚度也增加了一倍,达到目前的 60~70km。始新世晚期喜马拉雅地块尚位于北纬 5°左右,冈底斯地块位于北纬 15°左右,当时的纬度差为 10°,现今的纬度差为 3°,这表明,始新世末特提斯海消亡后,仅喜马拉雅-冈底斯造山系的地壳缩短量就达 700km 左右(李廷栋, 1985)。滑线场理论、逃逸构造说设定的将雅鲁藏布江断裂带与红河断裂带连成一条断裂带,作为“逃逸”、“挤出”构造的边界带,更是不可能,也不符合实际,因为横断山主体表现为 SN 向斜冲走滑断裂带。

3 东特提斯地质构造形成演化

自 100 多年前奥地利著名地质学家徐士(E Suess)推测地质历史时期,在古欧亚与非洲、印度之间存在过横贯赤道附近的大洋,并以希腊神话中的海神特提斯(Tethys)的名字命名以来,特提斯成为地质科学上经久不衰、百年热门的研究课题。特提斯地质的研究涉及到全球构造、地壳和岩石圈演化、洋陆变迁等重大地质学理论问题。

构造意义上的特提斯通常是指欧亚大陆南部一条全球性纬向展布的构造域,很多地质学家将其称为劳亚大陆与冈瓦纳大陆之间略呈东西走向的宽阔海洋,最终闭合消亡形成现今大陆上的巨型特提斯造山带。这一造山带是地球上地壳和岩石圈结构构造最复杂、造山带类型最多的构造域,它不但记录了特提斯海洋的发生、发展和消亡的全过程,而且也记录了劳亚大陆、冈瓦纳大陆和泛华夏大陆及其间陆壳碎块间的相互作用,并最终汇聚拼合、隆升的地质历史。这个纬向构造域在全球构造上的特殊空间位置、巨大的展布规模、复杂的洋陆演化史和多种多样的造山过程等,决定了它在全球构造、岩石圈演化,特别是大陆构造研究中占有十分重要的地位(潘桂棠等,1984,1997)。

3.1 特提斯地质研究项目实施的基本情况

项目是1993年由国家计委为支持第30届国际地质大会在我国召开,而设立“东特提斯地质构造形成演化”专项科研项目之一,地质矿产部科技司组织专家进行了可行性论证并批准开题,由地质矿产部成都地质矿产研究所负责实施。

1999—2010年国家启动了“新一轮国土资源大调查”专项,期间参加了2002—2007年国家“973”科技攻关项目“印度—亚洲大陆碰撞成矿作用”等研究。按照“新一轮国土资源大调查要填补和更新一批基础地质图件”的指示精神,中国地质调查局组织开展了青藏高原空白区1:25万区域地质调查攻坚战,调集来自全国24个省(区)地质调查院、研究所、大专院校等单位精干的区域地质调查队伍,每年近千人奋战在世界屋脊,徒步踏遍雪域高原,开创了人类地质工作历史史无前例的伟大壮举。

青藏高原平均海拔在4000 m以上,自然地理条件非常恶劣,含氧量仅为内地的50%,最低温度可达零下44℃。地质工作者本着神圣的使命感和强烈的事业心,继承和发扬“特别能吃苦、特别能战斗、特别能忍耐、特别能奉献”的青藏精神,脚踏世界屋脊,挑战生命极限,攀登地质科学高峰。在杳无人烟的可可西里,在悬崖万丈的雅鲁藏布江大峡谷,在生命禁区阿里和可可西里,开展了拉网式的地质调查。他们迎着刺骨的寒风和纷飞的雪花,克服高山反应带来的呼吸困难、剧烈头痛、失眠乏力等难以想象的困难,甚至冒着肺气肿、脑水肿等致命高原疾病的危险,用身躯、用生命丈量着一条条地质路线,谱写了一曲曲可歌可泣的时代英雄乐

章,用鲜血和汗水换来了丰硕的成果。

2001—2006年和2006—2013年,中国地质调查局分阶段组织实施了“青藏高原基础地质调查成果集成和综合集成”项目,在青藏高原空白区1:25万区域地质调查和国内外最新研究成果基础上,通过集成和综合研究,编制了青藏高原及邻区1:150万地质图及说明书、青藏高原及邻区1:150万大地构造图及说明书等地质、资源、地球物理、地球化学系列图件,为青藏高原区域资源勘查、国土规划、环境保护、重大工程规划与建设,为深化东特提斯地质科学研究提供了基础资料。

项目研究以中国特提斯地质研究达到世界先进水平、跃居国际领先地位为目标,揭示东特提斯造山带时空结构、层次的动态变化过程和特提斯洋陆岩石圈发展、转换的基本规律,建立东特提斯岩石圈演化模式,为资源开发、环境评价提供科学依据。项目研究过程中,立足于中国地质特色,把握国际特提斯研究最新动向,以既尊重前人的研究成果,吸取其精华,又不受前人观点束缚为原则,以创新的精神,在三个层次上开展了研究:

一是将特提斯作为一个系统,多学科、多层次、全方位地进行新、旧资料再开发的理论性综合研究。检索查阅有关特提斯地质研究的国内外文献、资料、图集,总计近千余份,为项目研究从单一造山带或盆地研究转向地球动力学作用下统一的相关性研究,从局部性、区域性转向全球性研究,从资料归纳转向综合性理论性演绎奠定了良好的基础。在理论研究中,应用大地构造相时空结构分析、二重—三分构造组合关系分析、比较大地构造的新方法,来解决或认识与特提斯演化历史密切相关的,诸如全球构造、地壳和岩石圈演化、洋陆变迁等重大地球科学问题。

二是针对急需解决的特提斯演化的关键性问题,项目组在过去近40年青藏及邻区的野外考察基础上,分别与中国西部大型沉积盆地分析及地球动力学项目组、地质矿产部“三江”攻关项目综合组、青藏高原新构造与隆升课题组等密切配合,共同开展了东特提斯构造域内,东起康滇、秦岭,西达阿里冈仁布齐峰,北至新疆,南抵喜马拉雅、滇西的野外考察研究,进一步查明了构造地层、岩石单元之间的相互关系,取得了一些疑难地层的微体化石的时代依据和性质不明地质体的地球化学数据等,为项目研究进一步总结特提斯地质特征与大地构造形

成演化过程创造了条件。

三是瞄准地质科学前沿,掌握当前国际研究动向,对近几年的洋陆转换、大陆动力学等前沿学科取得的成果进行了追踪调研,并开展了多次中外合作联合考察。对蛇绿岩的大地构造属性、变质软基底裂离地块的时空分布、沉积盆地的构造环境、火山岩浆弧的时空结构等问题求得了共识,为创新性建立东特提斯演化的运动学、动力学模式——大陆边缘多岛弧造山模式(即洋陆转换多岛弧盆系统演化模式)提供了科学依据。

3.2 集成研究的新进展、新认识和基本观点

(1)确认了喜马拉雅存在从奥陶纪到始新世长达5亿年以上厚达10km的沉积层序,为印度大陆边缘的地质记录,及全球显生宙海平面变化规律提供重要研究基地。

(2)归纳总结厘定了青藏高原地区20多条蛇绿混杂岩和俯冲消减杂岩组成的结合带(弧-弧碰撞带或弧-陆碰撞带)。班公湖-双湖-怒江-昌宁对接带、康西瓦-南昆仑-玛多-玛沁-勉县-略阳对接带是同一个原古特提斯大洋双向俯冲消亡的地质构造遗迹。

(3)总结了特提斯大洋及其两侧石炭—二叠纪冷、暖水动物群空间分布特征。冷水和暖水动物群以班公湖-怒江结合带为中轴两侧对称分布,即南侧冈底斯带为冷暖混生区,特提斯喜马拉雅带以冷水动物群为主体,含个别暖水型分子;北侧南羌塘带

为冷暖混生区,北羌塘-昌都及其以北以暖水型动物群为主体,含个别冷水分子;具体生物分区界线、气候带界线不等于板块界线。依据冰川事件可分为大陆冰川、陆缘冰川和漂浮冰山,综合研究认为冈瓦纳大陆及其北侧特提斯洋的石炭—二叠纪冰川事件空间展布,类似于现今南极大陆及其北侧的南太平洋冰川分布格局,即印度陆内为大陆冰川沉积,印度河-雅鲁藏布江带以南为陆缘海泥泥石流冰碛为主,班公湖-怒江结合带以南以冰融滑塌杂砾石的浅海沉积为主,而班公湖-怒江结合带及以北地区以含冰山消融落石的深海沉积为主,其浊积岩型的泥板岩是特提斯洋盆的沉积物。

(4)在归纳集成基础上,以沉积建造、火山岩建造、侵入岩浆活动、变质-变形等地质记录为基础,以成矿规律和矿产、能源预测的需求为基点,以不同规模相对稳定的古老陆块区、不同时期的造山系和大洋消亡的对接带的大地构造相环境时空结构分析为主线,以特定区域主构造事件形成的优势大地构造相的时空结构组成和存在状态为划分构造单元的基本原则,将青藏高原及邻区划分出8个一级构造单元(一条特提斯大洋最终消亡的班公湖-双湖-怒江-昌宁-孟连对接带,秦-祁-昆、羌塘-三江和喜马拉雅-冈底斯三大造山系及周缘塔里木、华北、扬子和印度四大陆块区)(图3),并进一步细化出37个二级构造单元、81个三级构造单元(潘桂棠等,2012,2013,2015)。

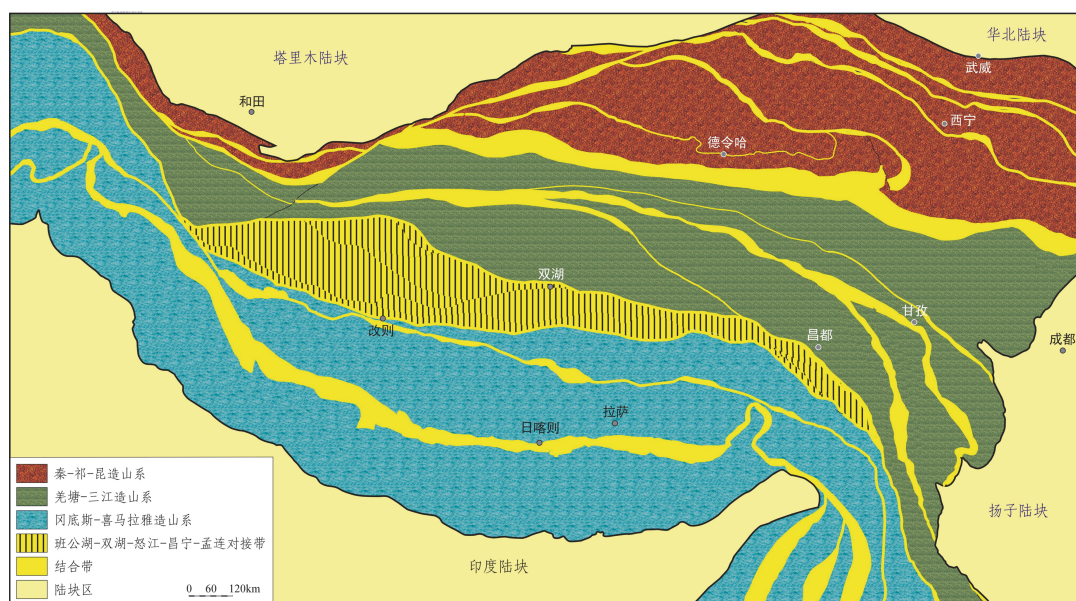


图3 青藏高原及邻区大地构造格架略图

Fig. 3 Schematic tectonic map of Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent areas

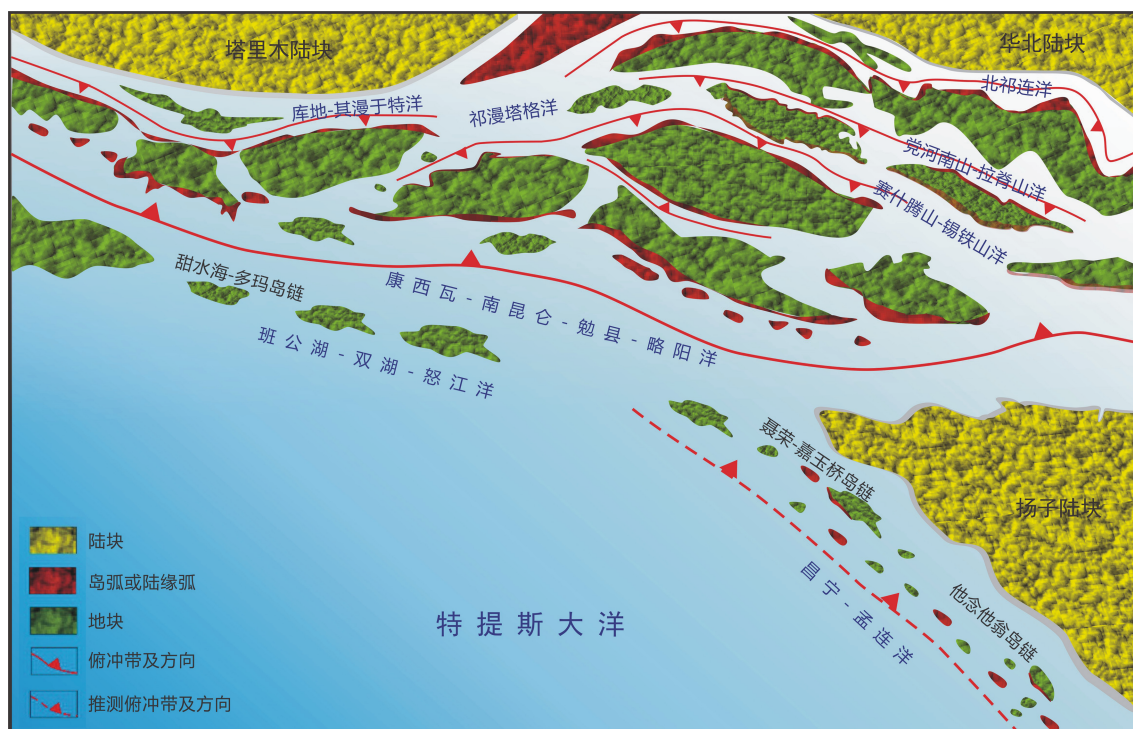


图4 早古生代(奥陶纪)特提斯洋及秦-祁-昆多岛弧盆系构造格局略图

Fig. 4 Tectonic framework of the Tethyan ocean and archipelagic arc-basin system in the Qinling-Qilian-Kunlun area during the Early Paleozoic

厘定了早古生代昆仑前锋弧以南为原特提斯洋,塔里木-华北陆块群以北为古亚洲洋,其间为秦-祁-昆多岛弧盆系构造区(图4)。各弧后洋盆的扩张期为震旦纪晚期—早奥陶世;火山岩浆弧形成于中奥陶世—志留纪,泥盆系普遍不整合。

厘定了(北)羌塘-三江地区为古特提斯大洋北西侧扬子古大陆边缘的多岛弧盆系构造区(图5),各弧后洋盆的扩张期为晚泥盆世—早二叠世,火山岩浆弧形成于早二叠世晚期—中三叠世,上三叠统普遍造山不整合。

发现冈底斯岛弧造山作用的一系列岩浆事件信息,厘定冈底斯带是以隆格尔-念青唐古拉为主轴,经历石炭—二叠纪、早中三叠世、晚三叠世、早—中侏罗世、晚侏罗世、早白垩世、晚白垩世—始新世6次造弧增生和相关弧-弧-陆碰撞作用,并最终定型于新生代晚期的复合造山带(潘桂棠等,2006,2013)。

在冈底斯东段,自从松多二叠纪N-MORB型榴辉岩发现后(杨经绥等,2006),近年来1:5万区调填图,厘定了长约80多公里的唐加-松多增生杂岩带,带中发现温木朗等地晚石炭世—二叠纪蛇绿岩(解超明等,2020;Wang et al.,2019),雪浪沟、柏日

岗、拉龙松多等地识别出多个洋岛-海山岩块,时代为晚石炭世—中二叠世(陈松永,2010;Wang et al.,2019;李光明等,2020),谢通门雄村发现早侏罗世洋内弧岩块增生楔(丁枫等,2012)。大量1:5万区调与研究成果,揭示南冈底斯带东段由北部晚古生代增生杂岩向南为中生代增生杂岩组成,其南侧为雅鲁藏布江俯冲增生杂岩带,表现为东西向连续展布和洋盆北向俯冲构造极性,整体呈现出由北向南后退式俯冲增生的古-新特提斯地质连续演化过程(李光明等,2020)。相应受控于洋壳向北俯冲作用的弧岩浆活动形成的增生弧,其时代由北向南逐渐变新,(T_3-J_1)雄来火山弧(李光明等,2020)、叶巴火山弧(J_{1-2})、桑日火山弧(J_3-K_1)(潘桂棠等,2006;王立全等,2013)以及大规模弧岩浆活动可延续到晚白垩世(莫宣学等,2005;潘桂棠等,2006;Zhu et al.,2008a、2008b;张泽明,2018)。正是这套晚古生代—中生代俯冲增生杂岩及增生弧的复杂岩石组合,可能构成了南冈底斯东段“新生下地壳”的重要物质基础(李光明等,2020;王立全等,2021);而新生下地壳的部分熔融,为驱龙-甲玛矿集区中新世斑岩巨量成矿提供了丰富的物质来源(侯增谦等,2008;莫宣学,2020)。

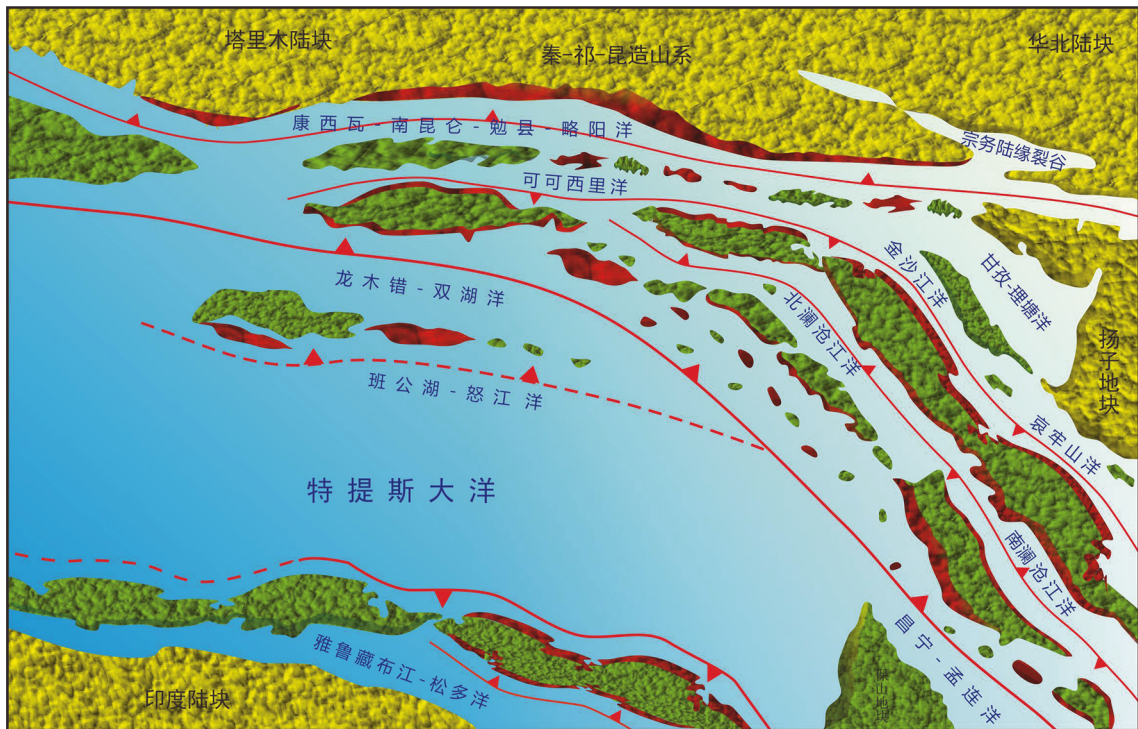


图5 晚古生代(二叠纪)特提斯洋及羌塘-三江多岛弧盆地构造格局略图(图例同图4)

Fig. 5 Tectonic framework of the Tethyan ocean and archipelagic arc-basin system in the Qiangtang to Sanjiang area during the Late Paleozoic

(5)提出了一个大洋(特提斯大洋)、两个大陆边缘(泛华夏大陆南缘和冈瓦纳大陆北缘)、三大多岛弧盆系(秦-祁-昆、北羌塘-三江及冈底斯-喜马拉雅多岛弧盆系)的青藏高原特提斯形成演化模式的原创性认识,建立了大陆边缘“多岛弧盆系构造”新模式,强调大陆边缘多岛弧盆系是受特提斯大洋俯冲制约,同时又是以弧后洋盆消减为动力,通过一系列弧-弧、弧-陆碰撞造山过程来实现,类似于受太平洋、印度洋双向俯冲形成的东南亚“多岛弧盆系”构造格局(潘桂棠等,1997,2003,2012,2015)。

提出原特提斯大洋起源于 Rodinia 超大陆裂解,表现为塔里木与扬子的裂离。古特提斯是原特提斯的继承和发展,新特提斯也不是古特提斯洋消亡后重新打开,有部分洋壳可被随后的印度洋归并。高原内部的班公湖-双湖-怒江-昌宁-孟连对接带及其一系列弧-弧、弧-陆碰撞结合带(蛇绿混杂岩带)均不是特提斯大洋打开的原始场所。

揭示出造山系是造山带的集成,是在大陆边缘受控于大洋岩石圈俯冲制约形成的前缘弧及其之后的一系列岛弧、火山弧、裂离地块和相应弧后洋

盆、弧间盆地或边缘盆地等多岛弧盆系,又经洋盆萎缩消减、弧-弧或弧-陆碰撞转化形成的复杂构造组合体,整体表现为大陆岩石圈与大洋岩石圈之间时空域中特定的组成、结构、空间展布和时间演化特征的构造系统,大陆边缘多岛弧盆系形成演化是大洋岩石圈向大陆岩石圈构造体制转换(简称洋陆转换)的重要标志。

早古生代时期,在泛华夏大陆群西侧已经出现昆仑前缘弧和康滇海岸山陆缘弧。昆仑前缘弧以北的秦-祁-昆早古生代多岛弧盆系构造转换形成秦-祁-昆造山系;从昆仑前缘弧和康滇陆缘弧裂离的唐古拉-他念他翁残余弧,构成泛华夏大陆西南缘晚古生代前缘弧,羌塘-三江的晚古生代到中生代是弧后扩张、多岛弧盆系发育、弧-弧碰撞、弧-陆碰撞转化为造山系的演化历史。特提斯大洋南侧的冈瓦纳大陆北缘,已有证据表明存在从石炭纪开始转化为活动大陆边缘的地质信息,中生代是西藏群岛的弧-盆演化史,中生代末期转化为喜马拉雅-冈底斯造山系。

(6)提出大陆块(克拉通)形成演化的三相壳层结构模型。华北1.8 Ga 前弧-陆、陆-陆碰撞作用形成基底,长城纪裂谷事件,蓟县纪-早古生代为

稳定型沉积盖层;扬子与塔里木 1.0~0.85Ga 前弧-陆、陆-陆碰撞作用形成基底,南华纪裂谷事件,震旦纪-古生代稳定型沉积盖层;冈瓦纳大陆(印度北缘)0.6~0.5 Ga 弧-陆、陆-陆碰撞形成泛非基底,寒武纪裂谷事件,奥陶纪-中生代-始新世稳定型沉积盖层。由此,我们将其归纳为“克拉通基底形成-裂解(裂谷)事件-稳定盖层”的三相壳层结构。华北型、扬子型和冈瓦纳型三相壳层结构的厘定,对于开展全球大陆地质对比,以及卷入造山系中裂离地块与母体大陆的亲缘性研究具有重要科学意义。

提出青藏高原地区不存在统一的前寒武纪变质基底,康西瓦-南昆仑-玛多-玛沁-勉县-略阳对接带以北,秦-祁-昆造山系内各构造带均见有前寒武纪变质基底残块,其中全吉地块、柴达木地块的前寒武组成、结构及地质演化历史与塔里木陆块和扬子陆块的扬子型三相壳层结构有很好的相似性(陆松年和袁桂邦,2003;陆松年等,1998,2004,2006;潘桂棠等,2013,2015)。康西瓦-南昆仑-玛多-玛沁-勉县-略阳和班公湖-双湖-怒江-昌宁对接带之间的北羌塘-三江造山系,其中巴颜喀拉、中咱-香格里拉、昌都-兰坪、北羌塘等裂离地块,是晚古生代扬子陆块西缘的裂离产物。保山、冈底斯、喜马拉雅地壳三相结构均为冈瓦纳型。

(7)晚前寒武以来,全球大陆可分劳亚、冈瓦纳和泛华夏三大陆块群。自 20 世纪初期形成较系统的大陆漂移说以来,解释全球大陆和大洋时空结构转换和特提斯大地构造形成演化的基本点,就是一个联合古陆形成,相应环绕“联合古陆”周围是一个泛大洋,特提斯只是泛大洋的海湾。“联合古陆”解体分离的陆块向泛大洋漂移,进而形成大西洋和印度洋,而太平洋是泛大洋萎缩而成。板块构造学说兴起以来,对于洋陆转换和特提斯地质的认识,更多的是强调冈瓦纳大陆的裂离和亚洲大陆的增生,而泛大洋同样存在。我们认为“剪刀张”模式、“传递带”模式、“开合”模式,只是特提斯大洋岩石圈构造体制向大陆岩石圈构造体制连续演化转换过程中的局部时空表现,特提斯演化与三分全球的三大陆块群的相互裂变-聚变作用过程密切相关。

通过东特提斯地质的深入研究,已有许多重要的证据表明,对显生宙大地构造及洋陆转换过程,采用单一联合古陆和泛大洋的传统模式是不合理

的。30 多年来,将东特提斯的演化看成是单一冈瓦纳大陆裂离碎块分别向北漂移俯冲碰撞的演化模式,必须重新考虑。晚前寒武纪以来,全球可分劳亚古陆群、冈瓦纳古陆群和泛华夏古陆群,它们自成体系独特的地质演化过程,且与三个以上的古大洋共存,不同时期有不同的时空格局(图 6)。在地质历史时期,没有形成过全球单一的巨大联合古陆,也不只是南北两大古陆群和泛大洋并存的时空格局。

(8)提出了特提斯三阶段划分方案。特提斯时空结构演化与显生宙全球三大陆块群相互之间的“裂-聚”动态变化过程密切相关,特提斯海(洋)从萌生、扩展、萎缩、消亡到汇聚造山的整个演化过程,受控于全球洋陆时空结构转换。晚前寒武至早古生代,地质、古生物、古地磁等证据表明,多数大陆聚集在南半球,呈现“南聚北散”的时空格局;晚古生代多数大陆聚集在西半球分南北两大陆群,与东半球的泛华夏陆群呈“三足鼎立”的时空格局;中生代以来,多数大陆漂移到北半球,表现为“北聚南散”的时空格局。特提斯演化就是在这一全球洋陆转换背景中发生、发展、消亡,并奠定了现今特提斯造山带的地壳结构基础。

原特提斯阶段(Z_1 -S),主要表现为华夏大陆群与劳亚大陆群的离散,劳亚大陆群与冈瓦纳大陆分裂,特提斯洋扩张。华夏大陆群与冈瓦纳大陆群联而不合。古特提斯阶段(D- T_2),主要表现为华夏大陆群与劳亚大陆的汇聚,古特提斯洋扩张到萎缩。劳亚大陆与冈瓦纳大陆群联而不合。新特提斯阶段(T_3 -E₂),主要表现为华夏大陆群与冈瓦纳大陆分裂碎块(印-澳板块)的汇聚。特提斯洋消亡,冈瓦纳古陆解体,特提斯大洋岩石圈转化为大陆岩石圈,并进入陆内碰撞造山作用发展时期。重组后的三大陆块群间产生强烈陆内汇聚。

特提斯大洋从发生发展到消亡是一个连续大洋岩石圈的演化过程,其生命期至少 400~600 百万年的时间尺度。而特提斯中多数已研究的蛇绿混杂岩带所恢复的扩张洋盆只经几十至两百百万年时限,仅相当于边缘海盆地的生命期。

(9)大陆斜向汇聚碰撞作用在特提斯构造域是最普遍的大洋岩石圈向大陆岩石圈体制转换的一种运动学和动力作用方式。以华夏大陆群的扬子克拉通为例,增生首先是印支、保山、昌都及中咱地块,分别与相邻的岛弧发生弧-弧或弧-陆碰撞成

复合体系,然后与自东南向北西斜向楔入的扬子发生汇聚碰撞。扬子克拉通先与东南侧的哀牢山带开始斜向碰撞造山(T_3),而北西段在川西还正发育弧盆系统(T_3)。同时,扬子克拉通北缘从西秦岭向

西到昆南、可可西里也是表现为从 T_2 — T_3 末的斜向连续碰撞。也就是说,扬子克拉通的向西斜向楔入,才最终全面关闭了古特提斯洋, T_2 — T_3 巴颜喀喇被动边缘盆地转化为前陆盆地。

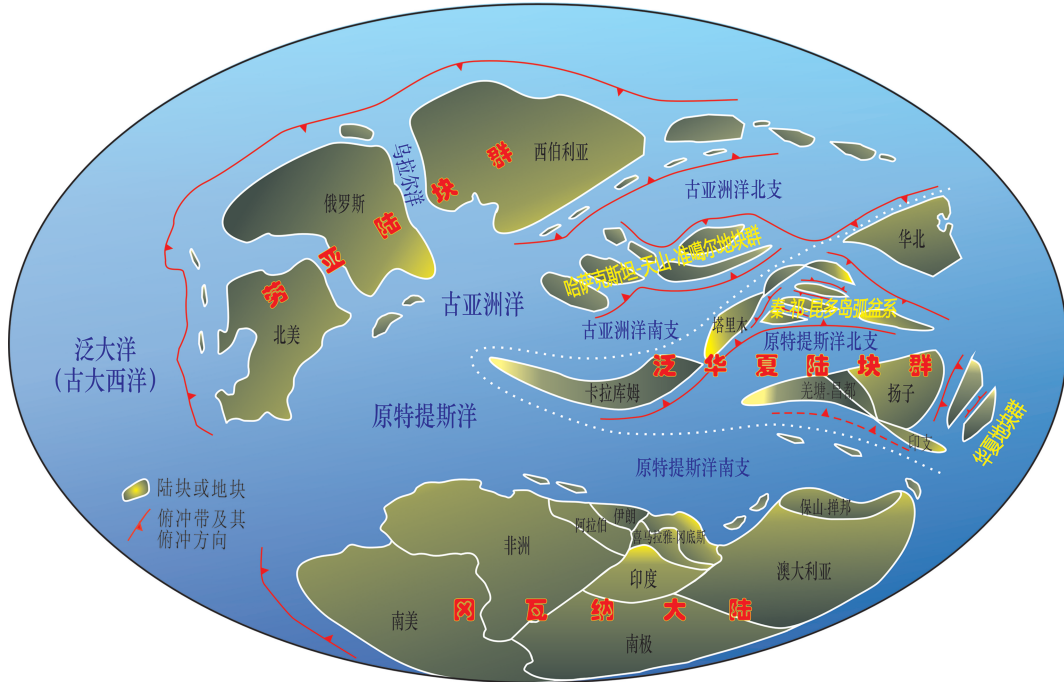


图6 全球早古生代洋-陆格局示意图

Fig. 6 Sketch map of global ocean-continent framework during Early Paleozoic(modified from Scotese, 2006)

关于昆仑带东延。长期以来,昆仑造山带南缘结合带,通常认为是向东秦岭造山及其相关的结合带相连,构成横亘中国大陆的“中央造山带”。通过对秦-祁-昆交接区的沉积古地理、火山岩浆活动等综合研究,认为昆仑岛弧造山带在柴达木地块东南缘布尔汗布达到鄂拉山弧弯一带,其构造古地理格架这表明昆仑与秦岭在地质上是两个独立的地质体。

(10) 洋-陆岩石圈构造体制的转换主要通过大陆边缘多岛弧盆系内弧后盆地消减、弧-弧碰撞、弧-陆碰撞的岛弧造山作用完成。从东特提斯地质来看,在特提斯大洋俯冲消减过程中,产生于泛华夏大陆群西部边缘多岛弧盆系内的一系列边缘海盆地、岛弧盆地及其上沉积物和其他如海沟岩石组合,在古生代以来大致从北到南连续被卷进岛弧造山作用中,最终转化增生为特提斯构造域大陆的岩石圈。前陆盆地的形成,乃是盆山转换的地质记录和重要标志。

青藏高原周边被印度、扬子、华北、塔里木四大陆块围限,内部由不同属性的构造块体,经过不同

时期沿特提斯大洋两侧古大陆边缘裂谷作用或弧后扩张,经弧后盆地萎缩消减,继而弧-弧、弧-陆、陆-陆碰撞作用,形成一系列增生碰撞造山带,并由它们敛合堆叠成一体的活动增生系统,相互之间以蛇绿混杂岩带(俯冲增生杂岩带)共同组成的活动构造带为界,主体显示出高原地区地壳破损伤镶嵌结构的构造系统。青藏高原古生代-中生代多岛弧盆系演化过程的物质组成、结构构造,极其类似于亚洲大陆边缘东南亚洋-陆转换过渡带(即多岛弧盆系)演化过程的地质构造特征,制约着青藏高原的形成演化,控制了青藏高原的隆升。

(11) 提出了“多岛弧盆系成矿论”。通过三江地区长达 20 年的攻关研究,对各大成矿带的系统解剖,发现三江地区晚古生代-中生代的成矿特色,均源于多岛弧盆系地质构造背景,造就特定的成矿构造环境及成矿作用类型,亦即多岛弧盆系的构造-地理格局控制各类矿床(点)时空分布。基于多岛弧盆系构造模式与成矿系统论、过程论和转换论的耦合,提出“多岛弧盆成矿论”。“多岛弧盆成矿论”概述为:伴随大陆边缘多岛弧盆系构造形成演

化过程,在特定时空结构构造环境演化序列中形成矿床的规律、成矿系统及成矿类型。在多岛弧盆系构造背景下,边缘海、弧后盆地中“大平掌式 VMS 型矿床”,洋内弧中产出“羊拉式 VMS 型矿床”,洋岛-海山中产出“老厂式 VMS 型矿床”,岛弧带中产出“普朗超大型铜矿床”和“孔马寺大型汞矿”,陆缘弧中产出“纳日贡玛大型 Cu-Au-Ag 矿床”、加多岭 Fe-Cu 矿床及“滇滩大矿山铜、铅、锌矿床”,弧间裂谷盆地中形成“呷村型超大型铜、银、锌矿床”,弧背裂谷盆地中产出“鲁春式 VMS 型矿床”,以及俯冲增生杂岩带(蛇绿混杂岩带)中的造山型金矿(如哀牢山俯冲增生杂岩带中的老王寨、冬瓜林、金厂及大坪等大型金矿),等等。这些理论模型在三江特提斯造山带的成矿规律研究、矿产勘查和预测评价中已见成效(潘桂棠等,2003;李文昌等,2010)。

3.3 青藏高原特提斯地质国际交流及评述

1995 年 7 月 24 日—8 月 12 日,我们与美国科学院院士许靖华、澳大利亚 C Powell 教授和李正祥博士、美国 L Winteren 教授、德国 S Bastin 教授、台湾地质学家卢佳遇和陈中华及李太枫教授等 15 位地质学家,开展格尔木-拉萨-聂拉木横贯青藏高原主体路线地质考察并进行学术交流,讨论的问题不仅是青藏高原,而且涉及大陆地质、全球构造、地球动力学等很多领域。许靖华详细讲述大洋俯冲制约形成的岛弧造山模式,比地体假说更具有生命力。而在冈瓦纳大陆北界问题上,他认为是可可西里-金沙江缝合带,我认为是班公湖-怒江-昌宁-孟连缝合带,并阐述了相关的地质、古生物、古气候及地球物理等系列依据;同时,还介绍了国内同行有的认为是雅鲁藏布江缝合带,等等。在拉萨宾馆讨论中,他和 Powell 教授等最后都同意是班公湖-怒江缝合带。

曾任美国地质学会主席的科学院院士伯奇费尔教授,从 1985 年开始与我单位长达 30 多年青藏、喜马拉雅、藏东-三江地学合作研究,尤其对《东特提斯地质构造形成演化》专著给予评价:“该成果提出了许多挑战性的新概念,构成了一个全新的理论体系。”

青藏高原及邻区地质图在意大利佛罗伦萨第 30 届国际地质大会展示,获得国际地质界赞赏,国际知名构造学家 Kapp P 博士评价:“近十年来为促进青藏高原国际地学研究和深入理解喜马拉雅-西藏-帕米尔造山系作出了最为重大的贡献。”

2005 年,“西南三江铜金多金属成矿系统与勘查评价”成果获得国家科技进步一等奖。2011 年,“青藏高原地质理论创新与找矿突破”成果获得国家科技进步特等奖。发表在《亚洲地质》中的《青藏高原构造演化》一文(Pan et al., 2012),成为 2010—2021 年间 ESI 排名全球前 1% 的高频次引用率文章。

4 青藏高原及特提斯地质研究展望

虽然我们团队在青藏高原研究已有 50 多年,但以青藏高原东特提斯构造演化命题,从全球大洋岩石圈与大陆岩石圈相互作用和转换的角度来研究,应该说还刚刚起步。迄今为止,特提斯大洋究竟起始于何时?是哪一大陆或哪两个大陆之间的裂变?还是个难题。

青藏高原物质组成的主体不是冈瓦纳大陆的裂离地体经五次漂移拼贴,而是显生宙不同时期特提斯大洋萎缩俯冲形成的多岛弧盆系统,经多期弧-弧、弧-陆碰撞组合汇聚成一体组构。这也许是在全球构造上能形成独一无二巨厚地壳高原的内在及本质的原因,研究青藏高原多层次的内部物质结构、物质间的相互作用和转换,以及相互作用与转换过程中的运动形态及规律,将始终是青藏高原形成演化无止境的研究前沿。

4.1 青藏及全球大地构造与岩石圈地球动力学研究

青藏高原是特提斯构造域的战略高地,由于它具有复杂而独特的岩石圈结构和巨厚的地壳,既记录了特提斯大洋岩石圈扩张、俯冲消亡及洋-陆转换、弧-弧、弧-陆碰撞造山和深部过程、圈层间相互作用的信息,又表现出与周边大陆岩石圈相互作用的耦合关系,尤其高原隆升是地球近 2 千万年来发生的最重大的地质事件之一,至今仍然是固体地球表层构造异常活跃的地区。开展青藏及全球大地构造与岩石圈地球动力学研究,不仅对于当今地球系统科学前沿研究取得突破性进展具有重大意义,对于探讨地圈-生物圈-水圈相互作用、阐明亚洲乃至全球气候、生态环境变迁,以及矿产资源、能源形成与开发和自然灾害的防治,也将发挥重要的作用;而且对于振兴边疆少数民族地区社会经济持续发展,保证国家长期繁荣昌盛具有重大现实意义。

把青藏高原与周边地区作为一个整体,针对固

体地球各层圈相互作用和动力学过程进行多学科综合研究,有助于提高本区乃至全球固体地球各圈层相互作用过程及运动机制的认知水平。青藏高原的固体地球作用过程是一种物理、化学和生物作用过程,为一种牵涉到成因和演化历史的活动,原有的地质体不断形成和被改造的过程,它表现为三个重要的构造过程,一是特提斯大洋岩石圈不断萎缩、消亡、弧-弧或弧-陆碰撞造山作用的过程;二是随洋-陆转换、盆-山转换和壳-幔转换,造山带不断形成而发生高原不断增长的过程;三是随陆内汇聚作用和高原隆升而发生的地壳大幅度缩短和增厚的过程。

研究这些过程和规律,重点在于量化研究这些地质、地球物理和地球化学过程,逐步减少对青藏高原岩石圈结构演化认识上的不确定性,把握这些过程的内部联系,概括出青藏高原形成演化的理论框架。要瞄准青藏高原岩石圈的成因、构造、形成过程和历史等基本科学问题,围绕共同的研究中心进行“聚焦”,创立具有国际领先水平的新的地球系统科学理论。

21 世纪研究的主要任务应包括以下几个方面:①地球内部各圈层之间的相互作用,即地壳(包括上、中、下地壳)、上地幔、软流圈和地核之间的相互作用和过程;②青藏高原大地构造系统和周边克拉通相关系统的相互作用,即青藏高原特定地质条件在全球体制中的位置及演变的过程;③青藏高原内部不同尺度各单元之间的相互作用、相互影响和相互调节的过程;④资源(能源)的形成分布规律;⑤青藏高原表层动态变化规律。值得强调的是,笔者提出的超大陆裂解-汇聚-重组的不可逆演化论、多岛弧盆系演化洋-陆转换论作为一个工作假设,应该可以作为进一步研究的初步理论框架,推动建立全球动力学新理论、新概念的优势点,作为沟通青藏高原地质特点和固体地球科学基本理论的结合点,作为评估青藏高原区域经济及社会持续发展和环境改善的支撑点。

根据国际地球科学发展趋势和前沿领域研究动向,结合青藏高原区域地质特色及可持续发展的需求,建议选择如下领域开展 21 世纪青藏高原岩石圈地球动力学研究。

(1) 青藏高原特提斯形成演化的全球构造背景

特提斯地质是地球科学上经久不衰、百年热门的研究课题,它涉及到全球构造、地壳和岩石圈演

化、洋陆变迁等重大地球动力学理论问题。青藏高原及邻区不但记录了特提斯洋的发生、发展和消亡的地球动力学全过程,而且也记录了劳亚古陆群、冈瓦纳古陆群与泛华夏古陆群(及它们之间的陆壳碎块)间的相互作用。特提斯洋的产生、发展和消亡,反映了地球系统大陆和大洋之间的物质交换作用,与我们对大洋物质在洋中脊生成和俯冲带消亡的了解程度相比,对青藏高原特提斯洋陆转换过程的了解却是较粗略地。基本上可以说,我们若不了解特提斯形成演化,则不可能了解青藏高原是怎样形成的。青藏高原特提斯形成演化需要从科学探索的理论层次上,认识理解三大起源问题:原-古特提斯洋起源于 Rodinia 超大陆解体,青藏高原的形成起源于特提斯构造演化,亚洲大陆生态环境变化起源于青藏高原隆升。三大起源问题引申外延有全球构造、地球系统科学的一系列问题,我们不仅要编制中国大地构造图,还应与志同道合者一起编制全球大地构造图,认识全球超大陆汇聚、裂解的时空格局,古大陆的漂移、旋转及相互关系的不可逆演化,看中国乃至全球大陆内部各陆块及造山系中裂离地块的原始归属、归位和构造的时空定位。

所以,青藏高原特提斯造山系(造山带)构造演化,是一个涉及全球大陆岩石圈和大洋岩石圈演化及相互转化的关键性问题。冈瓦纳与泛华夏(华北、塔里木及扬子等)、劳亚大陆的共同性和差异性是什么?特提斯的范围、格局、演化阶段?特提斯时空结构与显生宙全球三大陆块群相互之间的“裂-聚”动态变化过程?古大陆边缘和古海洋盆的性质是怎样?弧-盆系时空结构如何再造?洋盆扩张速率与最大宽度?洋盆消亡、消减速率、消减极性及其俯冲增生、碰撞过程。组成青藏高原超造山系统主体的一系列不同时期的洋壳消减带及岛弧造山带形成过程?特提斯带不同时期俯冲增生杂岩带(蛇绿混杂岩)时空结构及组成和岩浆弧的基本地质特征及地球化学的共同性、差异性是什么?其构造环境和深部地质作用过程怎么样?特提斯演化过程中壳、幔物质与能量交换的方式、速率与通量?它与环太平洋的俯冲增生杂岩(蛇绿岩)共同点和差异是什么?等等。

(2) 青藏高原岩石圈结构、物质组成、特征以及动力学过程

青藏高原的“双倍”地壳、“薄”的岩石圈和厚的地幔顶层及各圈层间低速层的发现,可以说是青

藏高原研究中的重大成果,但是阐明青藏高原岩石圈结构、组成、特征以及动力学过程远比原先预想的更困难、更复杂,牵涉的问题很多,如岩石圈各圈层的物质组成结构是什么?各圈层的变形、流变学特征和密度、强度变化的控制因素?低速层、高导层和壳幔混合层的地质含义及物理化学性质?壳幔的关系及其如何相互作用?高原内部波速、热流、密度如何定量?内部热流体的来源以及它如何控制地质作用的过程?岩石圈三维结构如何精细成像?青藏高原作为太阳系中旋转的地球体表面的物质瘤块,物质能量的输入、输出随机关系的制约因素是什么?等等。

(3)青藏高原及内部造山带壳幔物质循环、能量交换与岩浆成因

岩浆与岩浆岩是探(窥)测地球深部的“探针”与“窗口”,不仅可以借以研究洋盆扩张、消减过程的壳幔循环,而且也能够研究造山过程或高原隆升过程中的壳幔循环,对于认识青藏高原壳幔物质的结构、性状以及成矿演化过程、高原隆升及大陆动力学机理有重大意义。来自陆壳的物质能否再循环到地幔中?有多少物质是再循环和新生的?造山带中的巨型岩浆岩由哪里生长?什么因素决定着幔源岩浆是在莫霍层位或下地壳囤积还是向上侵位或喷发?当它们通过地壳上升时是如何演变的?与成矿作用的关系是什么?剥露于高原周边的高级变质岩区,尤其是麻粒岩相地质体通常是代表出露的下地壳剖面,它向我们揭示深部“流体”运移、地壳“成熟度”或陆块汇聚等哪些作用过程信息?地壳流体调节地壳岩石圈动力和化学性质的主要方式是什么?等等。

(4)青藏高原各类沉积盆地的形成及热力学行为

青藏高原不同时期盆地中的巨厚沉积物堆积,记录了地球动力学历史的时空细节,保存了岩石圈动力学和板块相互作用过程的信息。覆盖在青藏高原表层的沉积岩是我们取得有关地球动力学环境、大地构造单元厘定和地质年代的历史基础,但至今研究工作十分薄弱。需要进一步解决的问题是:盆地是怎样开始发育?它们的形成需要什么前奏?当盆地充填时,下沉机制是怎样随时间而发生改变的?伴随的沉积物负载如何改变原始盆地的几何形态?弧前增生楔杂岩在向大陆地壳增生转变的过程中,地壳的结构和化学成分会有什么变

化?如何识别老的与转换运动有关的走滑盆地?深部热事件会造成地壳的相互转换,从而引起盆地形成吗?沉积盆地中垂直运动的时空变化原因?沉积旋回和韵律的成因和机制如何?它们与海平面升降、米兰科维奇旋回的关系是什么?沉积通量和地球化学循环?盆地充填过程(三维分布)和层序发育过程?以及影响盆地充填的古气候因素?成矿(油气)的流体运移和聚集过程是怎样的?盆地与山脉的耦合关系是怎样的表现形式和转化方式?等等。

(5)青藏高原资源、能源时空分布规律和成矿流体动力学研究

青藏高原是陆壳块体多次离散与汇聚以及多弧-盆系复杂的组合地区,各种地质作用十分强烈,物质能量循环交换频繁,是各种矿产资源和能源的有利定位聚集区。虽然资源、能源的勘察工作已有很大进展,查明高原区蕴藏着丰富的铬、金、铜、铅、锌、锂、稀有金属,潜在总价值达几万亿元以上;水电资源超过2.5亿kW装机容量,石油资源量也有很大远景。可以成为我国经济持续发展的重要资源、能源的后备基地。

研究青藏高原资源、能源的关键,是系统研究其形成的地质构造背景,如铜、铅、锌多金属常形成于岛弧区,石油形成主要与大陆边缘盆地、前陆盆地及弧后盆地有关。青藏高原岩石圈结构单元(弧-盆)形成的地球动力学过程是如何控制成矿(油气)作用和资源、能源的形成过程?主要矿产铬、铜、贵金属、盐湖等形成与分布规律,成矿过程如何与岩浆、沉积、变质、构造作用过程相耦合?独立的矿带、矿田中幔源和壳源成矿物质的双重性的制约因素是什么?成矿元素的共扼性和对偶性控制因素等。应进一步加强青藏高原特别是西藏高原的含油气盆地资源评价与预测研究,青藏高原盐湖资源及热水矿床成矿机制研究,地热资源的前景及合理开发利用研究,各类岛弧带(陆缘弧、增生弧、洋内弧)的成矿作用及资源潜力研究,各个结合带的贵金属、宝石资源的远景预测研究。

(6)造山系地球动力学和青藏高原隆升机制综合研究

与全球绝大部分高原由克拉通地壳组成相比,青藏高原是由大洋俯冲制约的多岛弧盆系转化为造山系的地壳组成,其周边被克拉通围限,表现出超大时空尺度条件下的洋-陆转换和盆-山转换

造山作用等复杂的地质、地球物理行为特征。要深化多岛弧盆系时空结构、组成及演化规律研究,包括各俯冲增生杂岩带(蛇绿混杂岩带)岩石组合、时空结构的精细厘定,复原大洋及弧后洋盆的结构、组成及演化,弧-弧、弧-陆、陆-陆碰撞等三大类碰撞结合带的含义和基本特征及时空组合关系;对洋-陆转换过程形成的岛弧的构造背景、基底组成和动力学状态进一步划分类型,如以陆壳为基底的陆缘弧、以增生楔为基底的增生弧及洋壳为基底的洋内弧。

造山模式研究是当今地球科学研究的前沿课题,始终是地球科学的一个中心研究问题。在全球范围内大体发现几种类型的造山带,如阿尔卑斯-喜马拉雅陆缘造山型、科迪勒拉的大洋对大陆的俯冲增生型以及一系列岛弧造山。青藏高原内有多条巨大造山带,不同造山带形成于不同的造山时期,有些还是复合造山带,它们是由多弧-盆演化过程形成和改造的各种组分构成,造山模式各有自身的特点。因此,建立不同造山带的造山模式,对地球动力学理论的创建十分重要。要研究哪些作用控制着造山的物质和组成,造山过程地壳变形中出现怎样的物理过程(脆性和韧性变形作用过程),造山带年代学及造山过程物理模拟。

研究变质体变质、变形特征及折返剥露过程;研究隆升过程的古环境变迁及古生物演化;研究高原隆升对古造山带的改造。进一步加强各时期形成的俯冲增生杂岩带(蛇绿混杂岩带)在伴随青藏高原隆升过程中,均转化为新构造活动带与重大工程地质关键带耦合关系的研究。

青藏高原隆升机制问题的几个悖论:主体处于地壳均衡补偿与“三明治”结构的有效弹性厚度及下地壳流变性质;变形模式中的周边楔入,主体双向深俯冲与东部陆块阻抗问题;高原隆升过程中挤压抬升与重力坍塌的平衡;整体隆升与差异扩展隆升,地壳缩短和增厚是分布式还是集中式;主体高原地壳的物质组成和状态,是脆性还是塑性?等等。

运用现代地质学、现代流体物理学、非线性动力学和流变学等有关理论方法,从高原地壳运动的监测(包括水准、GPS、重力)、地震活动反演、活动构造调查及应用多重扩散域测年(MDD)测定高原各部分隆起的年代学历程等多方面的定量研究。从青藏高原关键性地质事实和地球物理、地球化学资料中,归纳出整体演化框架,建立可操作的物理模

型,开展构造物理与流变学实验研究,非线性动力学理论研究,高温高压下的物质状态、相变及反应动力学研究,并进行青藏高原隆升的计算机动态模拟。

4.2 进一步改善地学思维方式

地学工作研究的对象是地球,是我们认识的客体。地球观就是人们对地球这一客体形成演化规律的总看法,包括对地球起源与发展历程,地球的形状与物质组成,地球的构造与岩石圈构造特征,地壳运动起源与发展规律等一系列问题的根本观点。

地球科学是以地球整体的形成和演变规律为客体和研究对象的,在认识时空无限的物质世界中,我们应从微观-宏观-宇观不同层次来考察地球。对宇宙太空而言,地球是无限空间中的有限实体。就人们的视野而言,地球是人们常见事物中的庞然大物,并已经经历了至少46亿年的漫长演变历程。人们的足迹难以踏遍地球每个角落,只凭人们的视域是不可穷尽的,地球内部的奥秘更是看不见摸不着的。由此引申出地球科学具有一系列特殊性,例如地球空间展布的广阔性与地学观察的局限性,地球演变时间的漫长性与地球观察研究的短暂性,地球演变历程的复杂性与地质现象的零散性。地球科学的特殊性确定了我们从事地学研究的独特研究方法,宏观地质考察(包括地球物理的手段)是地学研究的基础,室内实验分析、计算机模拟等是地学研究的辅助手段。

地质科学一般研究方法,包括研究思路和思维方法,如比较地质学方法、时空结构分析、二重组合关系分析(造山带与盆地、高原与周边低地、消减与增生、扩张与汇聚、隆升与沉降、深部与表层等),以及概念模型、数学模拟和常规地学方法等。各项方法技术的运用,又受到更高层次的哲学思维即世界观方法论的指导。长期的地学实践已经认识到唯物辩证法是指导地球科学最基本的哲学思想。近几十年来,系统论、信息论、控制论和耗散结构理论、协同学、混沌学等的形成与发展,以及电子计算机的广泛应用,又为科学方法增添了新的时代内容,这些都为改善和发展地学思维创造了有利条件。可以说,由于科技进步和地学思维的革新,地质科学家已经能够从多角度、多层次、多形式去考察;从天地对比、全球对比、海陆对比、深浅对比、古今对比、内外对比、宏微对比去研究整个地球,从而

使得全面、系统、主体的研究和认识地球运动规律成为现实。坚持实践第一和地学思维的创新,是关键所在。

在思想方法上,要善于抓实质、抓核心、抓联系、抓关键、抓发展,这是因为人类赖以生存和发展的地球,是由内圈(核、幔、壳)固体地球和外圈(水、气)流体物质组成,还有生物圈叠加其上,构成一个完整的统一的物质体系,是在无机界和有机界五态物质并存(即固、气、液、电离态、生物态)的半封闭-开放系统。地球内圈与外圈,地球与天体持续地进行着物质、能量和信息的交换。

整个地球系统都是处在相互作用、相互制约之中,地球系统的运动,从一种状态或过程到另一种系统过程或过程的过渡、转换和演变,必然会留下地球内外地质作用的某些痕迹,同时总体随着数量不等的物质、能量和信息的流动。

当代地球科学正面临着理论领域的大变动,信息作为地学地质系统普遍联系的一种特殊形式,是充斥于整个地球(如指相化石提供的构造-岩相古地理信息,岩石变形形迹提供的地壳构造运动信息等)。信息为人们提供了研究地球演变史的基础。

旧观念的崩溃,改变了我们对自然现象的认识。现在我们强调的是人与自然和睦共处,改变以往抗拒自然、改造自然的状态。科学对自然界探测所拥有的工具,可以探测小至一百万亿分之一厘米(纳米级)的现象,远至宇宙边缘一千万亿千米以外,可以研究生存一百万亿分之一秒的短暂现象。对进化的认识上,曾经放之四海而皆准的达尔文主义,实际上只适于某些特定场合。许多生命科学家和人类学家正在研究“巨变理论”。科学家们指出,时间不是绝对的,而是相对的。根据不同的位置,测量到不同的结果。“黑洞”的存在,可使时间静止。在粒子和微波的世界中,有科学家指出了时间会倒流。对待时间的理论,对时间直线也许会做根本的修正。物质是不断重新分布。原相距遥远的可融为一体,彼此相聚者,裂离后不再重聚。我们应接受具有更多动态和相对性的空间观。在物质观的问题上我们更要注重研究事物的结构、关系和整体功能。

青藏高原在全球是独特的,但不是孤立存在的。它的形成有其深刻的全球构造背景和待查明的复杂的天文因素。青藏高原不仅是构成和认识环球特提斯的重要环节,也是阐明全球构造、大陆

动力学、全球变化的关键地区。随着研究领域不断拓宽以及新技术、新方法的引进和创新,促进了全球性、统一性的整体观的建立,加强了综合研究地球动力学系统的整体行为。强调地质、地球物理和地球化学和相关多学科的综合,进一步扩大研究领域和范围,既研究高原内部,也研究其周边;既探索高原的过去,也要预测其未来,实现研究时间尺度的双向延伸;既要研究地球各个圈层,也要研究天文因素的制约,实行空间尺度上的多层次研究。依托地域优势,针对高原本身演化的特点,加强资料综合研究的深度和力度,由一般性资料综合分析转向定量的计算机模拟。

总之,从更大的时空尺度、更精细的定量数据来探索认识青藏高原作为全球构造中的一个异常活跃单元的奥秘,必将能阐明青藏高原形成演化和隆升过程的全球构造背景及动力学机制、洋-陆和盆-山转化的过程及动力学、造山带的结构构造和演变过程。在此过程中,中国地质学家要为地球科学的理论发展作出应有贡献。

5 结语

完成一次青藏高原地质调查和研究课题,需要成千上万千米的艰苦跋涉,要翻越众多海拔4000米以上的大雪山,忍受长时间心脑血管缺氧的折磨,忍耐泥泞不平山路的疯狂颠簸,经受风霜、烈日的考验,克服在万丈绝壁上盘行车行的恐惧,习惯在脏、陋、简的篷馆旅宿。无论多苦、多累、多险,万水千山征程需要情系高原地质事业、坚定信念,以探索大自然奥秘为乐。

在空旷无垠的荒原上,在烈日炎炎的戈壁沙漠中,在前途险恶的雪山中,虽然经常遭遇饥寒交迫的困境,但却以“胜似闲庭信步”之心境,将高低贵贱、功名利禄统统置之度外,尘念消逝,天地人合为一体。青藏高原最能激活人们的爱心和无私奉献的精神,是我们认识高原的原动力。

风霜雨雪、冰雹雷电,气候瞬息万变。青藏高原最能显示地质调查科研人员适应环境变化的本能。天空透亮,斑斓绚丽的色彩,雄伟多姿的雪山、森林、草原,大自然各种景物在苍天中交相辉映,令人神清气爽,心旷神怡。青藏高原最能诱发人们的观察力、想象力、创造力,凸显地质学家适应环境变化的本能,提高理解高原形成演化及资源环境效应的水平。

地质科学研究主要做三件事:①观察、认识地

壳中发生的许多地质事件的记录和遗迹;②考察、理解这些地质事件之间的相互联系,时空结构和序列;③思考、演绎地质事件的动力学机制,证伪理论,完善和发展理论与任何自然作用过程一样,任何地质事实、地质事件、地质作用的形成过程都包含复杂的因素。

客观地说,地质科学的事实乃至理论、概念、原理都是一定历史阶段认知的产物。在大多数地质调查和研究过程,引入新的理论,与岩石对话,形成新的思路、观点和概念,必然意味着对原有理论、概念和观点的修正或否定。这就使得创新者必须面对来自原理论概念观点提出者、继承者和捍卫者的重重质疑,要使别人信服自己的发现、认识和观点,实际上要比艰辛研究提出新发现还要难!科学争论、争鸣是不可避免的。可惜当今地球科学界里争论、争鸣得太少。真正站在科学的前沿,评古论今,谈天说地不断创新的学者群体并不多见。而与大自然对话的地球科学中,那些被认可的“原理”、“定律”和“概念”给人的启迪、启发和留下的思考是应该被继承、完善、发展,毕竟我们今天的地球科学观包含了成千上万的科学家的发现,是科学界共同推动发展的结晶。

地质科学是一项伟大的事业,地质调查研究活动致力于反复观察和实验获得的地质记录,用一种综合模式表达,以求加深理解,成为破译奥秘的通用密码。同时,它又是一种冒险的事业,不确定的因素时时存在。这是一个富于献身精神、不屈不挠的探索历程。

成功的秘诀在于诚实、毅力和勤奋,但不成功的时候更多。一个人的体力、精力、能力实在有限,花去了大半辈子的岁月,跑了那么多路,爬了那么多山,付出了那么多的心血,历尽喜怒哀乐,尝遍酸甜苦辣,才获得今天这么一点点成果,一点点自己的认识。青藏高原地质、中国地质、特提斯地质、全球地质问题还是那样浩瀚,犹如迷茫烟雾,真心感叹“学海无涯”!

地球科学是探究地球历史的领域,研究地球物质组成、结构及分布规律,研究地壳岩石的分布和形成的规律,研究动力学机理的学科。阐明现在正在进行的地质作用,推断过去曾经发生过的地质作用,推断这些作用过程导致的效应,以及地壳岩石构造记录中表现出来的岩石圈演化的时空格局、物质运动状态、动力学机制。板块构造学焕然一新的理论观念、论证方法、思考方式,让我们研究大陆地质的人,也要研究大洋地质,研究岩石圈深部地质,

进而逐步探索大陆岩石圈是如何解体,大洋岩石圈是如何扩张,如何消亡,又如何汇聚增生碰撞转化为全新的超级大陆。

由于地质学家,尤其是大地构造学家考虑的各种不同时空尺度、不同层次、不同规模的地质事实。大至上万千米的地质事实,小至岩石物质内部晶体变形的地质作用现象,研究对象的时间范围从万年、亿年已扩大到四十六亿年,考察、观察工作极为复杂,难度很大。尽管如此,但是大自然中的地貌、地质景观展现在地球演化史最近期诞生的人类面前,都是一幅非常雄伟、壮观的应变图像,深邃莫测,变化无穷,充满着十分诱人的魅力。经过坚持不懈地认识—实践—再认识过程,揭示自然界地貌、地质、资源、环境的结构,物质运动状态,赋存状态,形成机制,建立符合客观规律的模式,无时无刻不激动人心,哪怕是一生的奉献,一代一代的探索。

到处留意,随时观察,知识会随时间的逝去而积累。一些新发现是艰苦跋涉获取的,一些新认识是苦苦思索求得的。当然,知识的日增,也会出现费心思、绞脑汁的苦闷,甚至煎熬与日俱增。要在事业上取得成功,必须有自信心,信心是立身行事的精神支柱,信心是志气和能力的结晶。

我们不忘初心、牢记使命,因神秘、神奇、神圣的青藏高原地质事业的需求而聚集在一起,顺应天时而有所感悟,回归地利而有意感念,融洽人和而有幸感知。本文为庆贺成都地质调查中心(成都地质矿产研究所)成立六十周年应邀而作。仅仅是我们认识高原、理解高原和情系高原的表达,以期望为推进青藏高原的地质研究尽力。由于水平能力有限,文中不当、错误及遗漏之处,我们将在今后研究工作中不断修正、完善,敬请同行专家不吝批评与赐教。

向长期战斗在青藏高原从事地质调查与研究的地质工作者们致以崇高的敬意!

参考文献(References):

- Hou Z Q, Khin Z, Pan G T, et al., 2007. Sanjiang Tethyan metallogenesis in S. W. China: Tectonic setting, metallogenic epochs and deposit types[J]. *Ore Geology Reviews*, 31(1-4):48-87.
- Hsü K J, Pan G T, Sengor A M C, et al., 1995. Tectonic evolution of the Tibetan Plateau: A working hypothesis based on the Archipelago model of orogenesis[J]. *International Geological Review*, 37: 473-508.
- Molnar P, 1989. The Geologic Evolution of the Tibetan Plateau[J].

- American Scientist, 77(4):350–360.
- Molnar P, Tapponnier P, 1975. Cenozoic Tectonics of Asia: Effects of a Continental Collision: Features of recent continental tectonics in Asia can be interpreted as results of the India-Eurasia collision[J]. Science, 189(4201):419–426.
- Pan G T, Wang L Q, Li R S, et al., 2012. Tectonic evolution of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 53:3–14.
- Scotese C R, 2006. Plate tectonic maps and continental drift animations [M]. Paleomap Project, Texas: Arlington.
- Stöcklin J, 1989. Tethys evolution in the Afghanistan-Pamir-Pakistan region. In: Tectonic Evolution of the Tethyan Region[J]. A. M. C. Sengör (ed.). Kluwer Academic Publishers, 259: 241–264.
- Wang B, Xie C M, Fan J J, et al., 2019. Genesis and tectonic setting of Middle Permian OIB-type mafic rocks in the Sumdo area, southern Lhasa terrane[J]. Lithos, 324–325: 429–438.
- Zhu D C, Pan G T, Mo X X, et al., 2005. SHRIMP U-Pb zircon dating for the dacite of the Sangxiu Formation in the central segment of Tethyan Himalaya and its implications [J]. Chinese Science Bulletin, 50(6):563–568.
- Zhu D C, Pan G T, Chung S L, 2008a. SHRIMP zircon age and geochemical constraints on the origin of Early Jurassic volcanic rocks from the Yeba Formation, southern Gangdise in south Tibet[J]. International Geology Review, 50(5):442–471.
- Zhu D C, Mo X X, Pan G T, et al., 2008b. Petrogenesis of the earliest Early Cretaceous basalts and associated diabases from Coma area, eastern Tethyan in south Tibet: interaction between the incubating Kerguelen plume and eastern Greater India lithosphere? [J]. Lithos, 100:147–173.
- Zhu D C, Mo X X, Zhao Z D, et al., 2010. Presence of Permian extension-and arc-type magmatism in southern Tibet: Paleogeographic implications[J]. Geological Society of America Bulletin, 122(7–8): 979–993.
- 常承发, 郑锡澜, 1973. 中国西藏南部珠穆朗玛峰地区地质构造特征[J]. 地质科学, 2:257–265.
- 常承发, 1980. 喜马拉雅地质构造带的划分和隆起原因探讨[C]//国际交流地质学术论文集. 北京:地质出版社.
- 陈智梁, 1994. 特提斯地质一百年[J]. 特提斯地质, 1:1–22.
- 陈松永, 2010. 西藏拉萨地块中古特提斯缝合带的厘定[D]. 北京:中国地质科学院.
- 迟效国, 李才, 金巍, 等, 1999. 藏北新生代火山作用的时空演化与高原隆升[J]. 地质论评, 51:978–986.
- 丁枫, 郎兴海, 胡正华, 等, 2012. 西藏雄村铜金矿 I 号矿体赋矿凝灰岩成因探讨:来自岩石地球化学、Sr-Nd-Pb 同位素地球化学特征的证据[J]. 地球学报, 33(4): 546–558.
- 邓万明, 1989. 西藏阿里地区北部新生代火山岩—兼论陆内俯冲作用[J]. 岩石学报, 44(3):1–11.
- 邓万明, 1998. 青藏高原北部新生代板内火山岩[M]. 北京:地质出版社.
- 丁林, 钟大赉, 潘裕生, 等, 1995. 东喜马拉雅构造结上新世以来快速抬升的裂变径迹证据[J]. 科学通报, 40:1495–1500.
- 丁林, 张进江, 周勇, 等, 1999. 青藏高原岩石圈演化的记录:藏北超钾质及钠质火山岩的岩石学与地球化学特征[J]. 岩石学报(3):408–421.
- 丁林, 周勇, 张进江, 等, 2000. 藏北鱼鳞山新生代火山岩及风化壳复合堆积物的组成和时代[J]. 科学通报, 45(14):1475–1481.
- 丁林, 来庆洲, 2003. 冈底斯地壳碰撞前增厚及隆升的地质证据:岛弧拼贴对青藏高原隆升及扩展历史的制约[J]. 科学通报, 48(8): 836–842.
- 董国臣, 2002. 林周盆地林子宗火山岩及其所含的印度—欧亚大陆碰撞信息研究[D]. 北京:中国地质大学(北京).
- 冯庆来, 刘本培, 1993. 滇西南昌宁—孟连构造带火山岩地层学研究[J]. 现代地质, 24(12):1135–1140.
- 冯庆来, 刘本培, 2002. 滇东南八布蛇绿混杂岩中的早二叠世放射虫化石[J]. 地球科学, 1:1–3+127–128.
- 冯益民, 何世平, 1995. 北祁连蛇绿岩的地质地球化学研究[J]. 岩石学报, 51:125–146.
- 耿全如, 潘桂棠, 刘宇平, 等, 2000. 雅鲁藏布大峡谷地区蛇绿混杂岩带初步研究[J]. 沉积与特提斯地质, 20(1):28–43.
- 耿全如, 潘桂棠, 郑来林, 等, 2004. 藏东南雅鲁藏布蛇绿混杂岩带的物质组成及形成环境[J]. 地质科学, 3:388–406.
- 耿全如, 潘桂棠, 金振民, 等, 2005. 西藏冈底斯带叶巴组火山岩地球化学及成因[J]. 地球科学(6):747–760.
- 耿全如, 潘桂棠, 王立全, 等, 2006. 西藏冈底斯带叶巴组火山岩同位素地质年代[J]. 沉积与特提斯地质, 26(1):1–7.
- 耿全如, 王立全, 潘桂棠, 等, 2007. 西藏冈底斯带洛巴堆组火山岩地球化学及构造意义[J]. 岩石学报, 11:2699–2714.
- 耿全如, 潘桂棠, 王立全, 等, 2011. 班公湖—怒江带、羌塘地块特提斯演化与成矿地质背景[J]. 地质通报, 30(8):1261–1274.
- 侯增谦, 杨岳清, 王海平, 等, 2003. 三江义墩岛弧碰撞造山过程与成矿系统[M]. 北京:地质出版社, 1–435.
- 侯增谦, 高永丰, 孟祥金, 等, 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(2):239–248.
- 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 等, 2006. 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):521–543.
- 侯增谦, 王二七, 莫宣学, 等, 2008. 青藏高原碰撞造山与成矿作用[M]. 北京:地质出版社.
- 黄汲清, 陈炳蔚, 1987. 中国及邻区特提斯海的演化[M]. 北京:地质出版社.
- 江新胜, 潘桂棠, 李兴振, 等, 1996. 晚古生代特提斯区热带、亚热带植物群的东西分异[J]. 岩相古地理, 16(2):34–41.
- 江新胜, 颜仰基, 潘桂棠, 等, 2003. 藏南特提斯晚侏罗世维美组的沉积环境[J]. 地质通报, 22(11–12):900–907.
- 李吉均, 1983. 青藏高原的地貌轮廓及形成机制[J]. 山地学报(1):7–15.
- 李才, 2006. 龙木错—双湖—吉塘板块缝合带与青藏高原冈瓦纳北界[J]. 地学前缘, 13(4):136–147.
- 李才, 董永胜, 翟庆国, 等, 2008a. 青藏高原羌塘高压变质带的特征及其构造意义[J]. 地质通报, 27(1):27–35.
- 李才, 2008b. 青藏高原龙木错—双湖—澜沧江板块缝合带研究二十年[J]. 地质论评, 54(1):105–119.
- 李光明, 潘桂棠, 王高明, 等, 2002. 西藏铜矿资源的分布规律与找矿前景初探[J]. 矿物岩石, 22(2):30–34.
- 李光明, 潘桂棠, 王高明, 等, 2004. 西藏冈底斯成矿带矿产资源远景评价与展望[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 31(1):22–27.
- 李光明, 张林奎, 吴建阳, 等, 2020. 青藏高原南部洋板块地质重建

- 及科学意义[J]. 沉积与特提斯地质, 40(1): 1-14.
- 李荣社, 杨永成, 孟勇, 2004. 青藏高原 1:25 万区域地质调查主要成果和进展综述(北区)[J]. 地质通报, 23(5-6): 421-426.
- 李荣社, 徐学义, 计文化, 2008. 对中国西部造山带地质研究若干问题的思考[J]. 地质通报, 27(12): 2020-2025.
- 李廷栋, 肖序常, 李光岑, 等, 1985. 略论青藏高原的地壳构造和地壳演化[J]. 大自然探索(2): 61-66.
- 李廷栋, 2006. 中国岩石圈构造单元[J]. 中国地质, 33(4): 700-710.
- 李廷栋, 潘桂棠, 肖序常, 2013. 青藏高原隆升的地质记录及机制[M]. 广州: 广东科技出版社.
- 李文昌, 潘桂棠, 莫宣学, 等, 2010. 西南“三江”多岛弧盆-碰撞造山成矿理论与勘查技术[M]. 北京: 地质出版社.
- 李兴振, 许效松, 潘桂棠, 等, 1995. 泛华夏大陆群与东特提斯构造演化[J]. 岩相古地理, 15(4): 1-13.
- 廖忠礼, 莫宣学, 潘桂棠, 等, 2003. 西藏过铝花岗岩研究近况[J]. 地学前缘, 10(4): 437-438.
- 廖忠礼, 莫宣学, 潘桂棠, 等, 2006a. 西藏过铝花岗岩的岩石化学特征及成因探讨[J]. 地质学报, 80(9): 1329-1341.
- 廖忠礼, 莫宣学, 潘桂棠, 等, 2006b. 初论西藏过铝花岗岩[J]. 地质通报, 25(7): 812-821.
- 刘本培, 1991. 滇西古特提斯多岛洋构造古地理格局[C]//中国西部特提斯构造演化及成矿作用. 成都: 电子科技大学出版社.
- 刘本培, 冯庆来, 方念乔, 等, 1993. 滇西南昌宁-孟连带和澜沧江带古特提斯多岛洋构造演化[J]. 地球科学, 18(5): 529-539.
- 刘增乾, 余希静, 徐宪, 等, 1980. 青藏高原地质基本特征[J]. 地球学报, 2(1): 23-46.
- 刘增乾, 徐宪, 潘桂棠, 等, 1990. 青藏高原大地构造与形成演化[M]. 北京: 地质出版社.
- 陆松年, 1998. 新元古时期 Rodinia 超大陆研究进展述评[J]. 地质论评, 44(5): 489-496.
- 陆松年, 于海峰, 赵凤清, 等, 2002. 青藏高原北部前寒武地质初探[M]. 北京: 地质出版社, 1-125.
- 陆松年, 袁桂邦, 2003. 阿尔金山阿克塔什塔格早前寒武纪岩浆活动的年代学证据[J]. 地质学报, 77(1): 61-68.
- 陆松年, 李怀坤, 陈志宏, 等, 2004. 新元古时期中国古大陆与罗迪尼亚超大陆的关系[J]. 地学前缘(2): 515-523.
- 陆松年, 2006. 中国前寒武纪重大地质问题研究中国西部前寒武纪重大地质事件群及其全球构造意义[M]. 北京: 地质出版社.
- 罗建宁, 彭勇民, 潘桂棠, 1992. 三江特提斯沉积地质与成矿[M]. 北京: 地质出版社.
- 罗建宁, 彭勇民, 潘桂棠, 1996. 东特提斯板块会聚边缘与岛弧造山作用[J]. 岩相古地理, 16(3): 1-16.
- 马杏垣, 1987. 中国岩石圈动力学概要[J]. 地质学报, 2: 113-125.
- 莫宣学, 路凤香, 沈上越, 等, 1993. 三江特提斯火山作用与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1-267.
- 莫宣学, 沈上越, 朱勤文, 等, 1998. 三江中南段火山岩-蛇绿岩与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1-128.
- 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 等, 2003. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J]. 地学前缘, 10(3): 135-148.
- 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 等, 2004. 青藏高原中生代火成岩的深部探针意义: 若干新成果与认识[C]//曾融生院士八十诞辰专辑. 北京: 地震出版社, 449-461.
- 莫宣学, 赵志丹, Depaolo D J, 等, 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.
- 莫宣学, 董国臣, 赵志丹, 等, 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(3): 281-290.
- 莫宣学, 2011. 岩浆作用与青藏高原演化[J]. 高校地质学报(3): 351-367.
- 莫宣学, 2019. 岩浆作用与地球深部过程[J]. 地球科学, 44(5): 1487-1493.
- 莫宣学, 2020. 从岩浆岩看青藏高原地壳的生长演化[J]. 地球科学, 45(7): 2245-2257.
- 潘桂棠, 焦淑沛, 王培生, 等, 1984. 试论青藏高原始新世-渐新世限的地质事件及大地构造意义[J]. 青藏高原地质文集(2): 147-155.
- 潘桂棠, 王培生, 徐耀荣, 等, 1990. 青藏高原新生代构造演化[M]. 北京: 地质出版社, 190.
- 潘桂棠, 1994. 全球洋-陆转换中的特提斯演化[J]. 特提斯地质, 23-40.
- 潘桂棠, 陈智梁, 李兴振, 等, 1997. 东特提斯地质构造形成演化[M]. 北京: 地质出版社, 198.
- 潘桂棠, 王立全, 李兴振, 等, 2001. 青藏高原区域构造格局及其多岛弧盆系的空间配置[J]. 沉积与特提斯地质(3): 1-26.
- 潘桂棠, 李兴振, 王立全, 等, 2002. 青藏高原及邻区大地构造单元初步划分[J]. 地质通报, 21(11): 701-707.
- 潘桂棠, 朱弟成, 尹福光, 等, 2005. 第32届国际地质大会聚焦特提斯地质研究进展[J]. 沉积与特提斯地质, 25(4): 99-107+94.
- 潘桂棠, 朱弟成, 王立全, 等, 2004a. 班公湖-怒江缝合带作为冈瓦纳大陆北界的地质地球物理证据[J]. 地学前缘, 11(4): 371-382.
- 潘桂棠, 王立全, 尹福光, 等, 2004b. 从多岛弧盆系研究实践看板块构造登陆的魅力[J]. 地质通报, 23(9-10): 933-939.
- 潘桂棠, 徐强, 侯增谦, 等, 2003. 西南“三江”多岛弧造山过程成矿系统与资源评价[M]. 北京: 地质出版社, 405.
- 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 等, 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. 岩石学报, 22(3): 521-533.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等, 2008. 大地构造相的定义、划分、特征及其鉴别标志[J]. 地质通报(10): 1613-1637.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等, 2009. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质, 36(1): 1-28.
- 潘桂棠, 王立全, 李荣社, 等, 2012. 多岛弧盆系构造模式: 认识大陆地质的关键[J]. 沉积与特提斯地质, 32(3): 1-20.
- 潘桂棠, 刘宇平, 郑来林, 等, 2013. 青藏高原碰撞构造与效应[M]. 广州: 广东科技出版社.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 尹福光, 等, 2015. 中国大地构造图(1:2500000)[M]. 北京: 地质出版社.
- 潘桂棠, 王立全, 耿全如, 等, 2020. 班公湖-双湖-怒江-昌宁-孟连对接带时空结构——特提斯大洋地质及演化问题[J]. 沉积与特提斯地质, 40(3): 1-19.
- 潘裕生, 2000. 喀喇昆仑-昆仑山地区地质演化. 北京: 科学出版社, 1-525.
- 孙鸿烈, 郑度, 1998. 青藏高原形成演化与发展[M]. 广州: 广东科技出版社.
- 谭富文, 潘桂棠, 王剑, 2000a. 滇西泥盆纪-三叠纪盆-山转换过程与特提斯构造演化[J]. 矿物岩石, 21(3): 179-185.
- 谭富文, 潘桂棠, 徐强, 2000b. 羌塘腹地新生代火山岩的地球化学

- 特征与青藏高原隆升[J]. 岩石矿物学杂志, 19(2): 121–130.
- 滕吉文, 王绍舟, 姚振兴, 等, 1980. 青藏高原及其邻近地区的地球物理场特征与大陆板块构造[J]. 地球物理学报(3): 254–268.
- 滕吉文, 2006. 青藏高原地球物理研究中几个重要问题之我见[J]. 地学前缘(13): 19–22.
- 王根厚, 贾建称, 万永平, 2006. 藏东巴青县北部西西岩组构造片理形成及构造意义[J]. 地学前缘, 13(4): 180–187.
- 王根厚, 张维杰, 周洋, 2008. 西藏东部嘉玉桥变质杂岩内中侏罗世高压剪切作用: 来自多硅白云母的证据[J]. 岩石学报, 24(2): 395–400.
- 王国灿, 张克信, 梁斌, 等, 1997. 东昆仑造山带结构及构造岩片组合[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 22(4): 352–356.
- 王国灿, 张天平, 梁斌, 等, 1999. 东昆仑造山带东段昆中复合蛇绿混杂岩带及“东昆中断裂带”的地质涵义[J]. 地球科学, 24(2): 130–133.
- 王鸿祯, 1979. 亚洲地质构造发展的主要阶段[J]. 中国科学(12): 1187–1197.
- 王立全, 潘桂棠, 李定谋, 等, 1999. 金沙江弧—盆地时空结构及地史演化[J]. 地质学报, 73(3): 206–218.
- 王立全, 朱弟成, 潘桂棠, 2004. 青藏高原1:25万区域地质调查主要成果和进展综述(南区)[J]. 地质通报, 23(5): 413–420.
- 王立全, 潘桂棠, 朱弟成, 等, 2008a. 西藏冈底斯带石炭—二叠纪岛弧造山作用: 火山岩及地球化学证据[J]. 地质通报, 27(9): 1509–1534.
- 王立全, 潘桂棠, 李才, 等, 2008b. 藏北羌塘中部果干加年山早古生代堆晶辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄——兼论原—古特提斯洋的演化[J]. 地质通报, 27(12): 2045–2056.
- 王立全, 潘桂棠, 丁俊, 等, 2013. 青藏高原及邻区地质图及说明书(1:1 500 000)[M]. 北京: 地质出版社, 1–88.
- 王立全, 王保弟, 李光明, 等, 2021. 东特提斯地质调查研究进展综述[J]. 沉积与特提斯地质, 41(2): 283–296.
- 吴福元, 刘志超, 刘小驰, 等, 2015. 喜马拉雅淡色花岗岩. 岩石学报, 31(1): 1–36.
- 吴福元, 万博, 赵亮, 等, 2020. 特提斯地球动力学[J]. 岩石学报, 36(6): 1627–1674.
- 肖序常, 李廷栋, 李光岑, 等, 1988. 喜马拉雅岩石圈构造演化(总论)[M]. 北京: 地质出版社, 1–194.
- 解超明, 李才, 李光明, 等, 2020. 西藏松多古特提斯洋研究进展与存在问题[J]. 沉积与特提斯地质, 40(2): 1–13.
- 杨经绥, 许志琴, 耿全如, 等, 2006. 中国境内可能存在一条新的高压/超高压(?)变质带—青藏高原拉萨地块中发现榴辉岩带[J]. 地质学报, 80(12): 1787–1792.
- 殷鸿福, 张克信, 1997. 东昆仑造山带的一些特点[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 22: 339–348.
- 尹福光, 2003. 羌塘盆地中央隆起性质与成因[J]. 大地构造与成矿学(2): 143–146.
- 尹福光, 孙志明, 文锦明, 等, 2011. 松潘—阿坝造山带地质特征及其演化[M]. 北京: 地质出版社.
- 袁四化, 潘桂棠, 王立全, 等, 2009a. 大陆边缘增生造山作用[J]. 地学前缘, 16(3): 31–48.
- 袁四化, 王立全, 江新胜, 等, 2009b. 多岛海(洋)及多岛弧盆系造山模式解析造山带演化的研究进展[J]. 地质科技情报, 28(5): 1–11.
- 张克信, 殷鸿福, 朱云海, 等, 2001. 造山带混杂岩区地质填图理论、方法与实践[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 张克信, 林启祥, 朱云海, 等, 2004. 东昆仑东段混杂岩建造时代厘定的古生物新证据及其大地构造意义[J]. 中国科学(D辑), 34(3): 210–218.
- 张克信, 王国灿, 季军良, 等, 2010. 青藏高原古近纪—新近纪地层分区与序列及其对隆升的响应[J]. 中国科学: 地球科学, 40(12): 1632–1654.
- 张克信, 王国灿, 骆满生, 等, 2013. 青藏高原及邻区新生代构造—岩相古地理图及说明书(1:3000000)[M]. 北京: 地质出版社, 1–299.
- 张泽明, 丁慧霞, 董昕, 等, 2018. 冈底斯弧的岩浆作用: 从新特提斯俯冲到印度—亚洲碰撞[J]. 地学前缘, 25(6): 78–91.
- 张智勇, 殷鸿福, 王秉璋, 等, 2004. 昆秦接合部海西期苦海—赛什塘分支的存在及其证据[J]. 地球科学, 29(6): 691–696.
- 赵志丹, 莫宣学, 罗照华, 等, 2003. 印度—亚洲俯冲带结构——岩浆作用证据[J]. 地学前缘, 10(3): 149–157.
- 赵志丹, 莫宣学, Sebastien NOMADE, 等, 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(4): 787–794.
- 郑来林, 金振民, 潘桂棠, 等, 2004. 东喜马拉雅南迦巴瓦地区区域地质特征及构造演化[J]. 地质学报, 78: 744–751.
- 周肃, 2004. 西藏林周盆地林子宗火山岩⁴⁰Ar/³⁹Ar年代格架[J]. 科学通报(20): 2095–2103.
- 钟大赉, 1998. 川滇西部古特提斯造山带[M]. 北京: 科学出版社, 1–231.
- 朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 等, 2003. 特提斯喜马拉雅二叠纪玄武质岩石研究新进展. 地学前缘, 10(3): 40–40.
- 朱弟成, 王立全, 潘桂棠, 等, 2004. 藏南特提斯喜马拉雅带中段中侏罗统遮拉组 OIB 型玄武岩浆的识别及其意义. 地质科技情报, 23(3): 15–24.
- 朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 等, 2006. 青藏高原中部 OIB 型玄武岩的识别: 年代学、地球化学及其构造环境. 地质学报, 80(9): 1312–1328.
- 朱弟成, 夏瑛, 裘碧波, 等, 2013. 为什么要提出西藏东南部早白垩世措美大火成岩省[J]. 岩石学报, 29: 3659–3670.
- 朱同兴, 黄志英, 尹福光, 1999. 盆山转换与沉积地质记录——以楚雄前陆盆地分析为例[J]. 岩相古地理, 19(3): 3–17.
- 朱同兴, 潘桂棠, 冯心涛, 等, 2002. 藏南喜马拉雅北坡色龙地区二叠系基性火山岩的发现及其构造意义[J]. 地质通报, 21(11): 717–722.
- 朱同兴, 张启跃, 董瀚, 等, 2006. 藏北双湖地区才多茶卡一带构造混杂岩中发现晚泥盆世和晚二叠世放射虫硅质岩[J]. 地质通报, 25(12): 1413–1418.