

许志琴, 杨经绥, 侯增谦, 等. 青藏高原大陆动力学研究若干进展[J]. 中国地质, 2016, 43(1): 1-42.

Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Hou Zengqian, et al. The progress in the study of continental dynamics of the Tibetan Plateau[J]. Geology in China, 2016, 43(1): 1-42(in Chinese with English abstract).

青藏高原大陆动力学研究若干进展

许志琴^{1,2,3} 杨经绥¹ 侯增谦¹ 张泽明¹ 曾令森¹ 李海兵¹
张建新¹ 李忠海¹ 马绪宣¹

(1. 大陆构造与动力学重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210046; 3. 中国地质大学(北京), 地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要:近 10 年来,“大陆构造与动力学实验室”在青藏高原大陆动力学研究,尤其在特提斯演化和青藏高原生长方面取得若干进展,包括(1)“青藏高原——造山的高原”理念的提出;(2)青藏高原特提斯体制和构造格架的再造;(3)新特提斯蛇绿岩中原位金刚石和深地幔矿物群的重大发现;(4)新特提斯洋盆俯冲新机制的揭示;(5)印度/亚洲碰撞的早期岩浆和喜马拉雅折返中的作用;(6)喜马拉雅三维碰撞造山机制和折返全过程的初步建立;(7)青藏高原东南缘物质逃逸的新机制——“弯曲与地壳解耦”的提出;(8)青藏高原俯冲型、碰撞型及陆内型片麻岩穹窿;(9)青藏高原东缘汶川强震的构造背景和强震机制;(10)青藏高原碰撞造山成矿模式;(11)印度/亚洲碰撞过程的数值模拟。综述和集成上述成果是为了与同行们交流磋商,进一步共同发展青藏高原大陆动力学理论,向国际地学前沿的冲刺。

关键词:青藏高原;大陆动力学;特提斯体系;印度-亚洲碰撞

中图分类号:P541 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2016)01-0001-42

The progress in the study of continental dynamics of the Tibetan Plateau

XU Zhi-qin^{1,2,3}, YANG Jing-sui¹, HOU Zeng-qian¹, ZHANG Ze-ming¹,
ZENG ling-sen¹, LI Hai-bing¹, ZHANG Jian-xin¹, LI Zhong-hai¹, MA Xu-xuan¹

(1. Key Laboratory of Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210046, Jiangsu, China; 3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100037, China)

Abstract: Based on the previously research, the research group of Key Laboratory of Continental Tectonics and Dynamics has achieved lots of great progress in the study of the continental dynamics of the Tibetan Plateau, especially in the evolution of Tethys

收稿日期:2015-11-25; 改回日期:2016-01-07

基金项目:国家自然科学基金项目(40921001,41430212,41202153,41472198)、中国地质调查局项目(1212010818094,12120115026861)和国土资源部行业专项基金项目(20511022,201211093)联合资助。

作者简介:许志琴,女,1941年生,研究员,中科院院士,长期从事青藏高原大陆动力学研究;E-mail:zxq@ccsd.cn.

and the growth of the Tibetan Plateau during the past decade. These achievements can be summarized as follows: (1) The Hypothesis on Tibetan Plateau as a orogenic plateau was proposed; (2) the reconstruction of the tectonic framework and the Tibetan–Tethys system; (3) the discovery of in situ diamond and deep mantle–derived mineral group in the ophiolites distributed along the Neotethyan suture zone; (4) the understanding of the subduction mechanism of the Neotethy oceanic basins; (5) the role of magmatism formed in the early stage of the Indo–Asian collision for the exhumation of Himalaya; (6) the establishment of the 3D models of the collisional orogeny and exhumation of the Himalaya; (7) the new proposal on the extrusion of the SE Tibetan Plateau: ‘crustal bending and decouple’; (8) the subduction–related, collision–related and continental gneiss domes with Tibetan Plateau; (9) the tectonic setting and the Wenchuan Earthquake mechanism on the eastern margin of the Tibetan Plateau; (10) Numerical modeling of the Indo–Asian collisional process. This paper aims to communicate with and stimulate interest among global geologists to make further development in the continental dynamics of the Tibetan Plateau.

Key words: Tibetan Plateau; continental dynamics; Tethys system; Indo–Asian collision

About the first author: XU Zhi–qin, female, born in 1941, professor, academician of Chinese Academy of Sciences, engages in the study of continental dynamics in the Tibetan Plateau; E–mail: xzq@ccsd.cn.

Fund Support: Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40921001, 41430212, 41202153, 41472198), Programs from China Geological Survey (No. 1212010818094, 12120115026861) and Industrial Foundation of Ministry of Land and Resources (No. 20511022, 201211093).

1 前 言

从19世纪末开始的青藏高原研究已持续200多年,地学家们的研究,不仅揭示了青藏高原所显示的复杂镶嵌结构,示踪了众多地体多次离散、聚敛、碰撞、移置、增生及联合的复杂地质历史,还揭示了大约60~50 Ma以来印度板块与欧亚大陆南部碰撞及其产生的巨大效应,以及青藏高原地壳、岩石圈及深地幔结构的基本构架。

50多年来,我国在青藏高原进行了大量基础地质调查研究和矿产资源勘查工作,已完成全区1:100万区域地质调查和航空磁测工作,大部分地区完成了1:20万或1:25万区域地质调查;部分地区进行了1:5万地质调查,在一些重要成矿区(带)开展了矿产普查和勘探。这些区域性地质调查成果,为建立青藏高原构造格架奠定了基础,为大陆动力学研究提供了指南,为找矿突破和社会需求提供了聚焦的目标。

青藏高原是太阳系行星中最高、最新、最厚的高原,是世界的屋脊,地学的瑰宝。穿越时空的隧道,青藏高原经历了新元古代以来至今的长期地质演化:(1)大约600~200 Ma东特提斯早期洋盆的开合、条带状微陆块群的多次聚敛、增生、碰撞和造山,铸成青藏高原的前身—“始–古特提斯复合碰撞造山拼贴体”;(2)170~60 Ma印度/亚洲碰撞的前夜,可能与深地幔柱成因有关的新特提斯洋盆的俯冲、消减、弧–陆碰撞、洋盆闭合以及蛇绿岩的构造

就位;(3)60~50 Ma以来印度/亚洲碰撞,继而印度陆块俯冲在亚洲大陆之下,导致喜马拉雅山崛起,青藏高原隆升,高原腹地的物质向东(东南)大逃逸以及2000 km范围的陆内变形的新生代最壮观的地质事件。最终构成由始特提斯、古特提斯和新特提斯复合地体和造山拼贴体组成的“造山的高原”——青藏高原^[1]。

青藏高原印度/亚洲碰撞动力学研究包括以下两大方面:东特提斯演化动力学和印度/亚洲碰撞动力学。为解决青藏高原大陆动力学的一些关键问题,我们从以下的方面进行思考和研究:

(1)印度–亚洲碰撞如何形成喜马拉雅造山带?喜马拉雅造山带中的不同类型的造山作用(冷造山与热造山)与区域应力场、岩浆作用、变质作用的关系?高喜马拉雅的三维挤出过程与全过程,以及深熔作用在喜马拉雅造山中三维作用?

(2)以冈底斯岩基为代表的大陆岩浆弧在印度–亚洲俯冲增生–碰撞造山事件中的构造意义?冈底斯大陆岩石圈的生长、分异和改造的动力学机理?

(3)印度–亚洲碰撞如何使两侧物质从挤压向走滑的构造转换?构造转换的时限、机制和过程?青藏高原东南缘物质侧向挤出(逃逸)的动力学机制?

(4)印度/亚洲碰撞的时限、过程;如何理解从物质挤压到逃逸转换的地壳行为,大陆增生和造山拼贴、构造剥蚀与高原化以及深部过程?

(5)印度–亚洲陆–陆碰撞之前的新特提斯洋盆

蛇绿岩形成机制?新特提斯洋盆是否与深地幔柱成因有关?

(6)与青藏高原生长紧密相关的成矿过程中,巨量物质如何堆积、转换、迁移和改造,以及成矿的动力学过程?

(7)如何认识青藏高原的深部结构与世界上其他高原的区别?

(8)印度板块俯冲于亚洲板块之下的物质组成和物理状态?青藏高原在印度-亚洲主碰撞带和东西两个构造结的俯冲角度、俯冲深度?青藏高原的深部结构与地壳变形的耦合关系?

本文介绍10余年来“大陆构造与动力学实验室”团队在青藏高原大陆动力学研究取得部分新成果,主要包括:(1)“青藏高原——造山的高原”理念的提出;(2)青藏高原特提斯体制和构造格架的再造;(3)新特提斯蛇绿岩中原位金刚石和深地幔矿物群的重大发现;(4)新特提斯洋盆俯冲新机制的揭示;(5)印度/亚洲碰撞的早期岩浆和喜马拉雅折返中的作用;(6)喜马拉雅三维碰撞造山机制和折返全过程的初步建立;(7)青藏高原东南缘物质逃逸的新机制——“弯曲与地壳解耦”的提出;(8)青藏高原俯冲型、碰撞型及陆内型片麻岩穹隆;(9)青藏高原东缘汶川强震的构造背景和强震机制;(10)青藏高原碰撞造山成矿模式;(11)印度/亚洲碰撞过程的数值模拟。

但是,青藏高原之浩瀚,研究难度之高深,依然有大量科学问题没有解决,需要我们继续的探究、完善和修正。

2 青藏高原大陆动力学研究的新成果

2.1 “青藏高原——造山的高原”理念的提出

地球上分布许多高原,除了青藏高原外,还有南美的巴西高原、东非的埃塞俄比亚高原、亚洲的中西伯利亚高原、蒙古高原、德干高原;南极冰雪高原和格陵兰冰雪高原;以及最小的法国中央高原。巴西高原是地球上面积最大的高原(约500万 km^2),平均高度1200~1500 m,它是在古老变质基底上形成的起伏平缓的“桌状高地”;东非埃塞俄比亚高原,号称“非洲的脊梁”,高度2500~3000 m,也是在古老的寒武纪基底杂岩的基础上覆盖广大的玄武岩流而形成;德干高原、南极冰雪高原和格陵兰冰

雪高原也都是以古老基底为基础而生长的高原;而蒙古高原和法国中央高原是在古生代造山带基础上发育的高原。由此可见,世界上大部分高原筑建在均一的刚性基底(地盾、克拉通)的基础上,少部分发育在造山软基底之上。

重塑地球早期的古地理和追溯青藏高原的前身发现,冈瓦纳超大陆形成(570~520 Ma)之后,在环冈瓦纳大陆北缘形成早古生代早期(530~470 Ma)的北印度造山带,与原始特提斯大洋相接,青藏高原南部及东南部(喜马拉雅、拉萨、羌塘—三江地体)保存早古生代早期(534~470 Ma)的岩浆、火山、变质和构造事件记录,揭示这些地体曾是北印度造山带的一部分,代表青藏高原前身的初始位置在南半球的冈瓦纳大陆的北缘。青藏高原的地体构架显示,早古生代以来的“原始特提斯”和晚古生代—三叠纪的“古特提斯”体系中诸多的条带状微陆块(地体)被“原始—古特提斯”洋盆包围:其中包括原始特提斯域的3条微地体:“阿尔金—祁连”、“北昆仑—柴达木”、“达北帕米尔—南昆仑”,和古特提斯域的5条微地体:“巴颜喀拉—松潘甘孜”、“中帕米尔—塔什库尔干/甜水海—北羌塘—思茅”、“茅南羌塘—保山”、“北拉萨—腾冲”和“冲南拉萨”。微地体之间的洋盆在消减过程中产生与原始—古特提斯洋盆俯冲相伴随的诸多“岛弧—增生”系列,形成早古生代的“北阿尔金—北祁连”和“祁南阿尔金—柴北缘”2条高压—超高压变质带,以及晚古生代—三叠纪的“金沙江—哀牢山—红河”、“龙木措/双湖—澜沧江”和“松多—墨竹工卡”3条高压变质带。微地体之间的洋盆的先后两次闭合构筑了由8条蛇绿岩带残片组成的缝合带,并致使微地体群先后两次碰撞,形成“阿—祁—昆原始特提斯(早古生代)复合造山系”和“松潘—羌塘—三江—拉萨”古特提斯(印支)“复合造山系”,阿尔金左行走滑断裂自240~220 Ma以来将阿尔金和祁连地体左行错位400 $\text{km}^{[1]}$ 。

因此,青藏高原前身的奠定,经历了原—古特提斯阶段的“多洋盆、多地体、多岛弧、多俯冲、多碰撞、多造山”洋的动力学过程,使来自冈瓦纳大陆周缘的地体群两次聚敛,而先后对接至“劳亚大陆”的南缘,形成青藏高原的前身——“原始—古特提斯造山拼贴体”^[1]。

60~50 Ma 新特提斯洋盆的闭合,从冈瓦纳大陆

脱离的印度大陆与亚洲大陆最后碰撞,导致青藏高原隆升、喜马拉雅崛起和大量物质向东和南东的侧向逃逸。通过诸多的条带状地体汇聚到最后的两大碰撞^[2,3],构筑了由“原始—古特提斯复合造山系”和“冈底斯—喜马拉雅新特提斯造山系”组成的“巨型复合碰撞造山拼贴体”^[1](图1)的过程。因此,它的物质组成包含了不同时期发育的多洋盆残片、多地体、多蛇绿岩带、多岛弧带、多增生楔、多高压—超高压变质带和多磨拉石前陆盆地等,它的构造形变显示了不同时期地壳和地幔范围内千姿百态的构造样式、运动轨迹和叠置关系(图1)。

众所周知,印度/亚洲大陆碰撞之后,板块之间汇聚收敛并未终止,印度板块仍以44~50 mm/a的速率往北推进,俯冲到亚洲大陆之下。约有1500 km的南北向缩短量由地壳增厚的过程来吸收,使青藏高原成为2倍于正常地壳厚度的巨厚陆壳体(平均厚度70 km)^[5-6]。青藏高原地震层析资料(图2)^[7]揭示了印度岩石圈冷板片在主碰撞带以平俯冲的方式插入青藏高原拉萨地壳之下(抵达班公湖—怒江缝合带),以及亚洲岩石圈板片向南俯冲在羌塘地壳之下的深部物理状态。表明青藏高原具有上部地壳造山加厚(平均70 km)的热结构和下部印度克

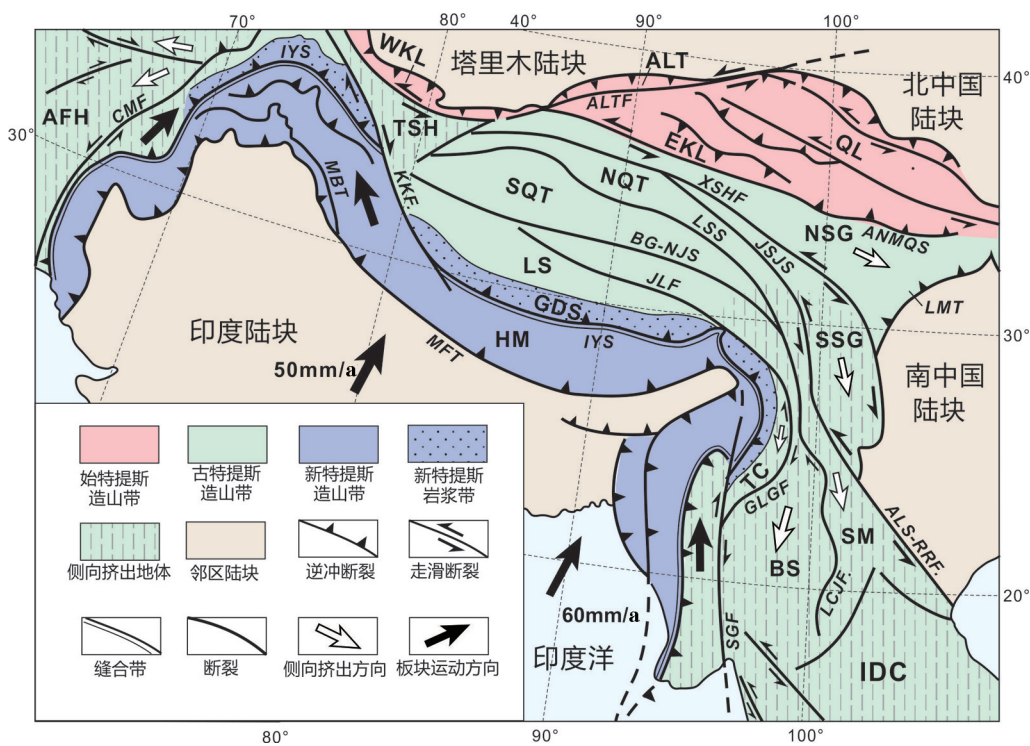
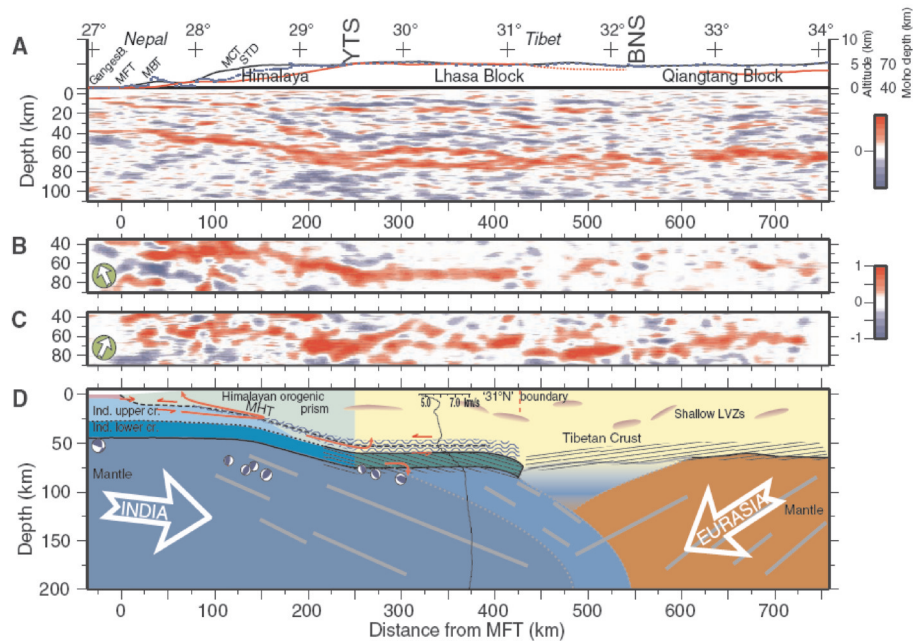


图1 青藏高原构造构架图(据许志琴^[4]修改)

QL—祁连地体; EKL—东昆仑地体; ALT—阿尔金地体; NSG—北松潘—甘孜地体; SSG—南松潘—甘孜地体; NQT—北羌塘地体; SQT—南羌塘地体; WKL—西昆仑地体; TSH—甜水海地体; LS—拉萨地体; TC—腾冲地体; BS—保山地体; SM—思茅地体; IDC—印度支那地体; HM—喜马拉雅地体; AFH—阿富汗地体; GDS—冈底斯地体; ANMQS—阿尼马卿缝合带; JSJS—金沙江缝合带; LSS—龙木错—双湖缝合带; BG—NJ—班公湖—怒江缝合带; IYS—印度—雅鲁藏布江缝合带; ALTf—阿尔金断裂; XSHF—鲜水河断裂; ALS—RRF—哀牢山—红河断裂; LCJF—澜沧江断裂; GLGF—高黎贡断裂; JLF—嘉黎断裂; SGF—实皆断裂; MBT—主边界冲断裂; MFT—主前缘逆冲断裂; KKF—喀喇昆仑断裂; CMF—恰曼断裂

Fig. 1 Tectonic framework of the Tibetan Plateau and surrounding regions (modified after Xu^[4])

QL—Qilian terrane; EKL—East Kunlun terrane; ALT—Altin terrane; NSG—North Songpan—Ganze terrane; SSG—South Songpan—Ganze terrane; NQT—North Qiangtang terrane; SQT—South Qiangtang terrane; WKL—West Kunlun terrane; TSH—Tianshuihan terrane; LS—Lhasa terrane; TC—Tengchong terrane; BS—Baoshan terrane; SM—Simao terrane; IDC—Indochine terrane; HM—Himalaya terrane; AFH—Afghanistan terrane; GDS—Gangdese terrane; ANMQS—Anyemaqen suture zone; JSJS—Jingshajiang suture zone; LSS—Lonhmucuo—Shuanghu suture zone; BG—NJ—Bangongonghu—Nujiang suture zone; IYS—Indus—Yaluzangbujiang suture zone; ALTf—Altyn—Tagh Fault; XSHF—Xiangshuihe Fault; ALS—RRF—Alaoshan—Red River Fault; LCJF—Langcangjiang Fault; GLGF—Gaoligong Fault; JLF—Jiali Fault; SGF—Sagaing Fault; MBT—Main Bounded Thrust; MFT—Main Frontal Fault; KKF—Karakunrun Fault; CMF—Chaman Fault

图2 横穿青藏高原地震层析剖面图^[7]

Qingtang Block—羌塘块体; Lhasa Block—拉萨块体; Himalaya—喜马拉雅; Nepal—尼泊尔; BNS—Banggonghu—班公湖—怒江缝合带; STD—藏南拆离系; MCT—主中冲断裂; MBT—主边冲断裂; MFT—主前锋冲断裂

Fig. 2 Seismic topography profile across the Tibetan Plateau^[7]

拉通性质的刚性冷结构组成的双层结构,平俯冲的印度岩石圈板片可以看作青藏高原地壳的底板。深部结构还显示了青藏高原岩石圈地幔的缺失和下地壳低速层的存在,推测青藏高原岩石圈地幔的缺失与岩石圈冷板片的嵌入和青藏高原下地壳的拆离有关。根据青藏高原南缘喜马拉雅山脉的南北缩短量为 18 mm/a;北缘祁连山的缩短量为 16 mm/a,高原腹地的东西向伸展速率为 10 mm/a^[8],高原腹地处在东-西向伸展的构造环境,造成隆升、垮塌和剥蚀的高原地貌。

因此,青藏高原具有复杂、不均一、多地体拼贴的、相对热的、巨厚地壳(60~70 km)组成的造山软基底,完全不同于具有简单的、均一的、稳定的、冷的、薄地壳(30~40 km)和刚性古老基底组成的世界上其他高原。青藏高原是“造山的高原”理念的提出和进一步完善,对于重新审视特提斯演化和认识青藏高原成因有着重要意义。

2.2 青藏高原古构造格架的进一步重建

2.2.1 青藏高原北缘原特提斯构造格架和演化的进一步重建

位于青藏高原北缘的“阿尔金—祁连—柴北缘

—昆仑山”早古生代造山系被认为是青藏高原最北部的构造拼合体,是来自冈瓦纳大陆北部大陆诸多块体相互碰撞的产物。然而,与青藏高原南部新特提斯洋闭合所引起的两个主大陆(印度大陆与欧亚大陆主体)碰撞形成的喜马拉雅碰撞造山带不同,青藏高原北部早古生代造山系包括有更大比例的蛇绿岩、弧岩浆杂岩、深海沉积岩(俯冲-增生杂岩)等增生物质,因此一些学者认为青藏高原北部的早古生代造山系为沿塔里木和华北克拉通边界向南逐渐增生的增生型造山带^[9-12]。然而,与其北侧具有长期增生历史的中亚造山系相比(如[13-15]),它包含有更大比例的大陆块体或古老大陆再造的物质组成^[16-26],所以增生造山模式很难解释南阿尔金—柴北缘地区普遍存在的与大陆俯冲有关的超高压(UHP)变质岩、广泛分布的巴罗式变质作用和相关的岩浆作用,以及与碰撞造山有关的变形构造等。

张建新等通过对已有研究资料的综合总结,结合近年来新的研究资料,提出在青藏高原北缘的阿尔金—祁连—柴北缘造山系中,早古生代时期存在两种不同类型的造山作用,即增生和碰撞造山作用,其主要标志是北祁连—北阿尔金的HP/LT变质带、蛇绿混杂

岩及与洋壳俯冲有关的构造岩浆作用,以及分布在柴北缘—南阿尔金与大陆俯冲和陆陆碰撞有关的高压—超高压变质带、区域巴罗式变质作用、深熔作用、相关的岩浆活动及伸展垮塌作用。在此基础上,建立了原特提斯洋俯冲、增生、闭合及碰撞造山作用的年代格架:与增生造山有关的HP/LT变质作用和岛弧岩浆作用(460~510 Ma);与大陆俯冲和碰撞造山有关的UHP变质作用(440~500 Ma)、巴罗式区域变质作用(400~450 Ma)及同时代的深熔作用和广泛分布的花岗质岩浆活动(图3)。

2.2.2 青藏高原古特提斯构造格架的重建

Xu et al (2015)全面综述青藏高原古特提斯构造格架,认为青藏高原古特提斯大地构造格架可分为具有截然不同的二叠纪和较新的沉积序列及生物序列^[27]的两个体系:西部的东基墨里体系和东部的西华夏体系。东基墨里体系包括南羌塘—北拉萨—保山—Sibumasu—南拉萨地体,而西华夏体系包括北羌塘—思茅—印支地体和松潘—甘孜地体。其中发育有5条蛇绿混杂岩带(分别为东昆仑—阿尼玛卿带、甘孜—理塘、金沙江—哀牢山—松马、龙木措—双湖—昌宁—孟连和景洪蛇绿岩带),5个火山岛弧(布尔汗布达岛弧岩浆带、义敦火山岩

岛弧带、龙木措—双湖火山岛弧带、松多火山岛弧带和左贡—临沧岛弧—碰撞岩浆带),4条弧前增生楔或增生杂岩(西秦岭增生楔、巴颜喀拉—松潘—甘孜增生楔、双湖—聂荣—吉塘—临沧增生楔、松多增生杂岩)以及4条高压变质带(松马、龙木措—双湖、墨江、松多)。东基墨里和西华夏体系在晚三叠—早侏罗世时期拼合,形成巨型印支造山带^[28](图4)。

在青藏高原的古特提斯体系中,呈带状分布的蛇绿岩和蛇绿混杂岩带、岛弧岩浆带、高压—超高压变质带和弧前增生楔组成的若干条缝合带,是古特提斯洋盆闭合的印记,记录了古洋盆演化和大陆碰撞过程。西华夏体系中包括分隔“松潘—甘孜”和“昆仑”地体的“昆仑—阿尼玛卿缝合带”,以及分隔“北羌塘—昌都—思茅—印支”和“南中国地块”的“金沙江—哀牢山—松马缝合带”,以及新发现位于南拉萨和北拉萨地体之间的“松多古特提斯缝合带”。多条蛇绿岩带、蛇绿混杂带、高压—超高压变质带和岩浆弧带和弧前增生楔伴随外来地块出露在上述缝合带中^[28]。

造山作用发生在洋盆俯冲、板块碰撞和陆内折返的过程^[29-30],增生造山带与洋内俯冲及大陆边缘消减有关,往往由超级俯冲带、弧前带、岩浆弧带和

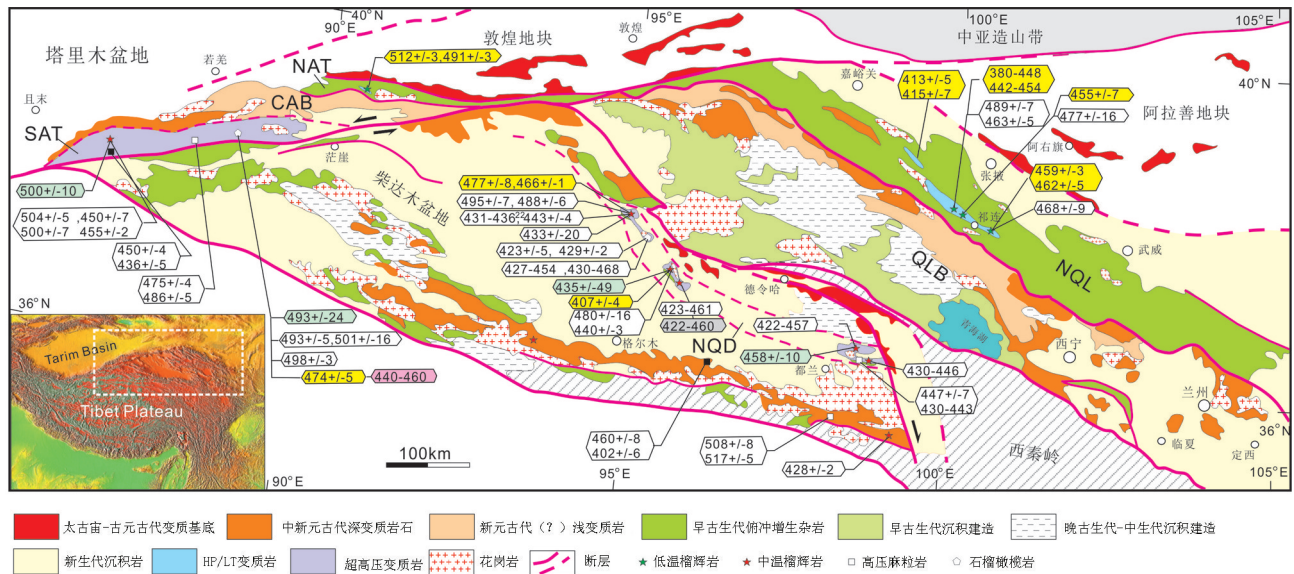


图3 祁连—阿尔金早古生代变质作用年代格架图

NQL—北祁连地体; QLB—祁连地块; NQD—北柴达木地体; NAT—北阿尔金缝合带; SAT—南阿尔金缝合带; CAB—中阿尔金地块

Fig. 3 Schematic tectonic map of the Qilian-Altun Early Paleozoic orogen showing metamorphism age

NQL—North Qilian terrane; QLB—Qilian block; NQD—North Qaidam terrane; NAT—North Altin suture zone; SAT—South Altun suture zone; CAB—Central Altin terrane

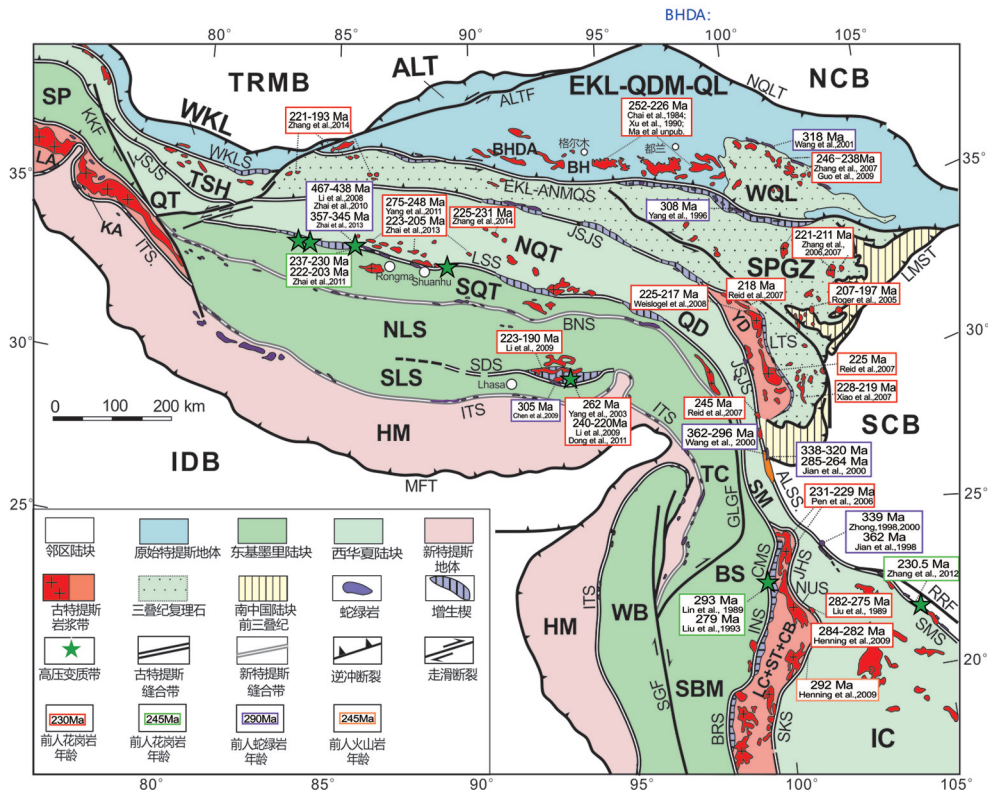


图4 青藏高原古特提斯构造格架图^[28]

显示青藏高原古特提斯体系由东基墨里(淡绿色)和西华夏陆块组成(深绿色)

EKL—ANMQS—东昆仑—阿尼玛卿缝合带; WKLS—西昆仑缝合带; LTS—理塘复合带; JSJ—ALS—SMS—金沙江—哀牢山—松马缝合带; LS—CM—龙木措/双湖—沧宁/孟良缝合带; JH—NU—SKS—景洪—Nan Uttaradit—Sra Kaoe缝合带; BNS—班公湖—怒江缝合带; SQH—JLS—狮泉河—嘉里缝合带; SDS—松多缝合带; ITS—印度斯—雅鲁藏布缝合带; BHDA—布尔汗布达弧地体; YDA—义敦岛弧; LC—ST—CBA—临沧—Sukhothai—Chanthaburi弧地体; KHA—科希斯坦弧地体; LDA—拉达克弧地体; WQL—西秦岭地体; ALTF:阿尔金断裂; NQLT—北祁连逆冲断裂; LMST—龙门山逆冲断裂; RRF—红河断裂; KKF—喀喇昆仑断裂; MFT—主前锋逆冲断裂; SGF—实皆断裂; GLGF—高黎贡断裂

Fig. 4 Schematic tectonic map showing the Palaeo-Tethys system and geochronological data of the East Cimmerides and West Cathaysides in Tibet^[28]

EKL—ANMQS—East Kunlun suture zone; WKLS—West Kunlun suture zone; LTS—Litang suture zone; JSJ—ALS—SMS—Jingshajiang—Ailaoshan—Songma suture zone; LS—CM—Lingmucuo—Shuanghu—Channing—Mengliang suture zone; JH—NU—SKS—Jinghong—Nan Uttaradit—Sra Kaoe suture zone; BNS—bangonghu—Nujiang suture zone; SQH—JLS—Shiquanghe—Jiali suture zone; SDS—Songduo suture zone; ITS—Indus—Yaluzangbujiang suture zone; WQL—West Qiling suture zone; BHDA—Bulhanbuda arc terrane; YDA—Yidun arc; LC—ST—CBA—Lingcang—Sukhothai—Chanthaburi terrane; KHA—Kohistan arc terrane; LDA—Ladakh arc terrane; WQL—West Kunlun terrane; ALTF—Altyn Tagh Fault; NQLT—North Qilian Thrust; LMST—Longmenshan Thrust; RRF—Red River Fault; KKF—Karakunrun Fault; MFT—Main Frontal Fault; SGF—Sigaing Fault; GLGF—Gaoligong Fault

弧后带等组成^[29-30]。增生造山带可以有非常迥异的变形和变质作用,经常出露有高温和高压双变质带^[31-33]。青藏高原的古特提斯俯冲体系包括岩浆弧地体和增生杂岩(或增生楔)。古特提斯岩浆弧地体和俯冲增生楔出露在青藏高原南部和东南部,包括昌宁—孟连东部的“临沧岩浆弧带”,位于理塘缝合带和金沙江缝合带之间的“义敦岛弧带”,东昆仑—阿尼玛卿缝合带北部“布尔汗布达岛弧带”和“西

秦岭增生楔”及南羌塘—北拉萨地体和南拉萨地体之间的“松多俯冲增生地体”。

青藏地区的古特提斯构造主要以多地体、多蛇绿混杂岩带、多高压变质带、多岛弧地体和包含大量外来物质的弧前增生楔为特征。在晚古生代和中生代期间,具有冈瓦纳亲缘性地体跨越古特提斯洋盆而拼贴增生到亚洲大陆上形成多条缝合带^[35-39]。自泥盆纪以来,龙木措—双湖—昌宁—孟连缝合带分割东

基墨里和西华夏体系的主缝合带,是由于特提斯主洋盆闭合而形成,其他缝合带可能代表古特提斯洋盆的分支^[40]。

根据蛇绿岩带两边的变形岩石结构以及火山岩的位置和地球化学特征反映的演化极性,可以推断在晚古生代—早三叠世期间,古特提斯洋盆板片具有双向的俯冲极性。西藏北部的东昆仑地体南缘的东昆仑—阿尼玛卿洋盆板片具有向北俯冲的极性;藏中地区,金沙江—哀牢山洋盆板片具有向南俯冲极性,而“龙木措—双湖—昌宁—孟连”蛇绿岩带是古特提斯主洋盆板片向北俯冲在“羌塘—思茅—印度支那”地体之下、进而闭合的产物。同时,北拉萨地体和南拉萨地体之间的松多洋盆板片具有向北的俯冲极性。

2.2.3 古特提斯域几个问题的讨论

1)关于“龙木措—双湖—昌宁—孟连”混杂岩带的归属和成因

“龙木措—双湖—昌宁—孟连”混杂岩带的归属和成因解释主要存在“原地”和“异地”两种迥异的模型。原地模型主要是基于东—西向的“龙木措—双湖缝合带”中包含有高压变质岩,蛇绿混杂岩;并且北羌塘地体的晚古生代地层中包含有具有华夏亲缘性的暖水动物群,而南羌塘的地层中则为具有冈瓦纳亲缘性的冷水动物群。南北走向的昌宁—孟连缝合带作为龙木措双湖缝合带的南延,也包含蛇绿混杂岩,岛弧火山岩,弧后盆地沉积和含有泥盆—三叠纪放射虫的深海复理石等^[37-38, 41-43]。基于缝合带两边不同的石炭—二叠纪沉积地层和化石序列^[36-37, 44]这些缝合带明显代表了重要的地体边界。因此,该蛇绿混杂岩是缝合带原有的一部分。而异地模型^[45-46]认为,龙木措—双湖蛇绿混杂岩带是早中生代期间松潘—甘孜大洋岩石圈沿着金沙江缝合带向南平俯冲于羌塘地块之下,并底侵就位。但是,龙木措—双湖蛇绿混杂岩与金沙江缝合带之间有200 km距离,让人很难理解后者的平俯冲模型解释形成于60~80 km深度的高压变质岩^[47]。

2)藏南松多古特提斯缝合带的归属

西藏地区二叠纪海相沉积出露于包含具有不同生物地理属性的多个生物群的地块中,北羌塘—昌都地体中的二叠纪海相动物群具有典型的华夏亲缘性,而喜马拉雅地体的海相沉积物主要是以冷

水动物群为主,仅含有少量的暖水外来生物群落。介于两者之间的南羌塘和拉萨地块属于基墨里大陆的一部分,主要以冷水和暖水混合动物群为特征,因此我们认为南羌塘和拉萨地块在班—怒新特提斯洋盆打开之前属于同一地块。

松多缝合带包含有蛇绿岩带,高压榴辉岩,岛弧火山岩和增生楔等,是南羌塘—北拉萨和拉萨地块之间新发现的古特提斯缝合带^[48]。这表明,藏南地区的古特提斯洋主缝合带(龙木措—双湖—澜沧江—昌宁—孟连缝合带)的边界从北边的新特提斯班—怒缝合带位置向南跃迁至现今为止。与此同时,松多古特提斯洋盆可能代表古特提斯主洋盆的一个分支,向北俯冲与北拉萨地体之下。

3)松潘—甘孜造山带中三叠纪复理石的归属

研究表明,分布在松潘—甘孜造山带西部的晚古生代—三叠纪的沉积地层,特别是巨厚的三叠纪复理石序列,与扬子克拉通上的晚古生代—早中三叠世浅海沉积和晚三叠世陆相煤系沉积有着本质区别,代表了两个构造单元中完全不同地质环境。夹持于向北俯冲的东昆仑—阿尼玛卿古洋盆和向南俯冲的金沙江洋盆之间的松潘—甘孜地体中西康群三叠纪地质体,是一个巨大增生杂岩地体。根据三叠纪的碎屑物源来自北部、南部和西部的依据^[1],该地体可能为东昆仑古特提斯布尔汗布达弧前增生楔、扬子陆块西缘增生楔与北羌塘地体弧前增生楔组成的复合增生杂岩体。

4)金沙江—哀牢山古特提斯洋盆俯冲的“沟—脊—沟”模式

研究表明,金沙江—哀牢山蛇绿岩和龙木措/双湖—昌宁/孟良蛇绿岩代表古特提斯洋板片以相对的方向俯冲在青藏中部的北羌塘—思茅—印度支那地体之下。金沙江—哀牢山洋盆的俯冲显示了“沟—脊—沟”三结合的模式,即扬子陆块沿着金沙江—哀牢山洋两个海沟(金沙江海沟及哀牢山海沟)俯冲在北羌塘—思茅—印度支那地体之下,在金沙江和哀牢山两条海沟之间,存在扬子被动陆缘西缘与地幔柱成因有关的裂谷带——二叠纪玄武岩,海沟与“地幔柱中脊”共同组成三结点结构,为此笔者提出“沟—脊—沟”模式^[28]。

5)青藏高原古特提斯体系的构造演化模型

对青藏高原古特提斯体系的演化模型(图5)主

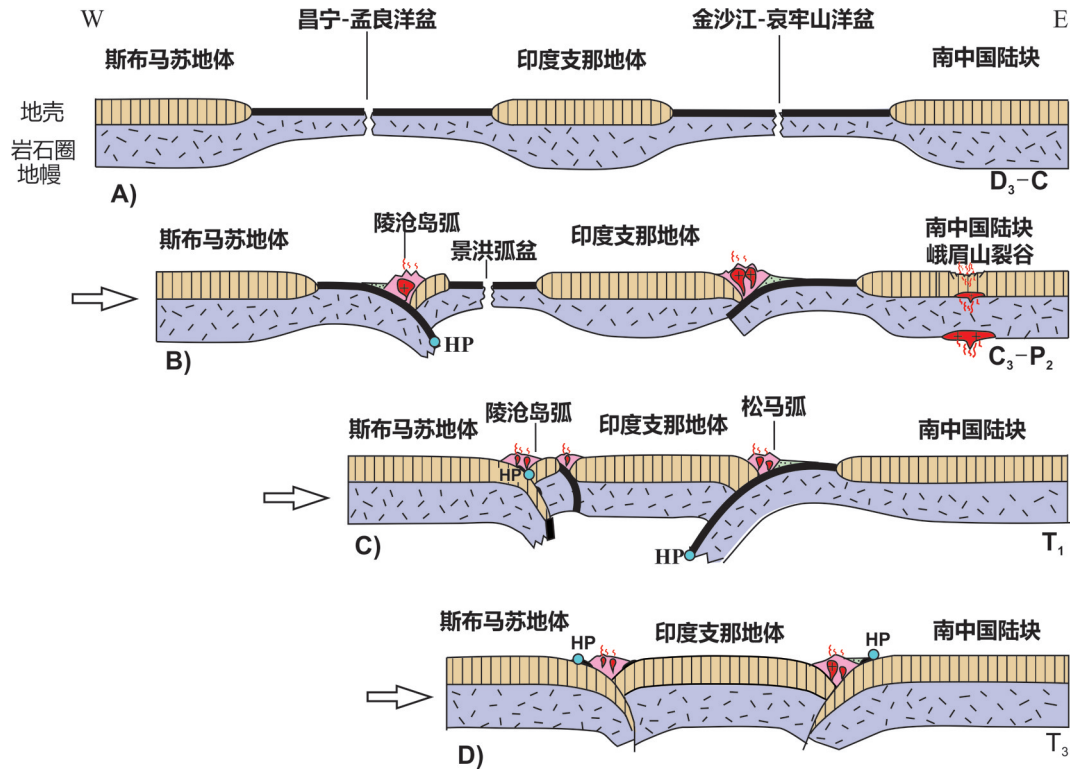


图5 横穿青藏高原东南缘 E-W 向古特提斯碰撞造山系的构造演化示意图(据 Xu^[28])

Fig.5 Schematic tectonic model for Paleo-Tethys evolution along EW-trending profile of southeastern Tibet (after Xu^[28])

要有以下几点认识:

(1) 古特提斯洋盆开启

古特提斯洋盆开启在泥盆—石炭纪期间,在东基墨里和西华夏陆块之间形成龙木措—双湖—昌宁—孟连蛇绿混杂岩带。金沙江—哀牢山—松马蛇绿岩带(380~330 Ma),东昆仑—阿尼玛卿蛇绿岩带(约308 Ma)和松多蛇绿岩带(约305 Ma)分别是东昆仑和松潘—甘孜地体,松潘—甘孜地体和北羌塘—昌都—思茅—印支地体,以及北羌塘/拉萨—腾冲/保山—苏布马苏地体的边界,均为古特提斯洋盆的分支。

(2) 古特提斯大洋板片的早期俯冲阶段

在青藏高原北部,东昆仑—阿尼玛卿洋壳板片向北俯冲于东昆仑地体之下,并形成布尔汗布达岛弧地体(240~226 Ma);在藏南,松多洋壳板片向北俯冲于北拉萨—南羌塘地体之下,并形成石炭—二叠纪火山岩岛弧。在西藏东南缘,昌宁—孟连古特提斯洋壳板片向东俯冲印支地体之下,形成墨江高压变质带(294 Ma)和临沧岛弧地体(254 Ma)。岛弧地体的形成伴随着景洪弧后盆地的张开(282~264 Ma)。金沙江—哀牢山—松马洋壳板片向西俯

冲于昌都—思茅—印支地体之下,在该时期(257~263 Ma),南中国板块的西缘发育有深部地幔柱引起、地表张裂形成的峨眉山双峰式火山岩。在西藏中部,龙木措—双湖古特提斯洋壳向北俯冲于北羌塘地体之下,并形成相应的岛弧地体(275~248 Ma)。

(3) 古特提斯洋壳晚期俯冲阶段

在三叠纪期间,古特提斯洋的持续俯冲,自北向南形成西秦岭增生楔,义敦岛弧(220~205 Ma)、龙木措—双湖岛弧地体(220~205 Ma)和高压变质带(244~238 Ma),以及松马缝合带(232 Ma)。墨江和松多高压变质岩带形成于俯冲阶段早期,然后从较小的深度发生折返。景洪弧后盆地闭合于中三叠世。

(4) 古特提斯有的闭合及地体碰撞

在三叠纪晚期—侏罗纪期间,青藏的许多古特提斯洋盆的闭合,导致巨大的古特提斯印支造山带的形成。

2.3 新特提斯大洋的深地幔成因:蛇绿岩铬铁矿中原位金刚石等深地幔矿物的发现

通过研究地球深部的物质组成和结构,追索地球表层活动的深部根源,是固体地球科学领域一项

难度很大、探索性很强的前沿性研究。但地表能发现的深部矿物(特别是深地幔矿物)十分稀少,人们往往通过高温高压实验及地球物理方法,推测深部地球物质的组成、存在方式、物理化学条件及动力学演化模式长期以来,经典的板块构造理论认为,代表大洋残片的蛇绿岩地幔橄榄岩(即大洋地幔橄榄岩)通常来自浅部地幔。在白文吉、方青松等研究基础上,杨经绥等通过20多吨不同特征的矿样,和24000薄片的研究,不仅仅在雅鲁藏布江蛇绿岩地幔橄榄岩和铬铁矿中发现3000多粒微米级金刚石,并且还发现6颗原位金刚石和大量深地幔矿物群,提出蛇绿岩型金刚石新类型,建立铬铁矿深部成因的新模式,使之成为一个极具挑战性的新的前沿性研究。

2.3.1 新特提斯蛇绿岩中原位金刚石和深地幔矿物群的重大发现

新特提斯蛇绿岩中原位金刚石和深地幔矿物群的重大发现主要表现为:在雅鲁藏布江蛇绿岩带东部的罗布莎铬铁矿矿石找到原位产出的金刚石^[49-51](图6);在罗布莎铬铁矿中的钛铁合金边部还发现超高压矿物柯石英(Coesite)和蓝晶石(Kyanite),晶形和组构测量反映柯石英由不同排布

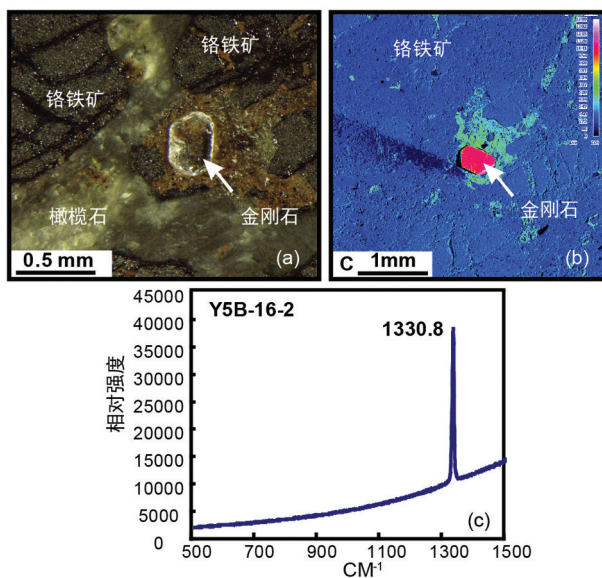


图6 俄罗斯极乌拉尔的Ray-Iz早古生代蛇绿岩铬铁矿中发现的原位金刚石(05B-16-2)(据Yang^[50])

Fig.6 In-situ diamonds hosted in irregular (sample Y5B-16-2) patches of amorphous carbon within chromitite of the Ray-Iz ophiolite (after Yang^[50])

方向的多晶组成,表明其为斯石英(Stishovite)的假象($P > 10$ GPa),形成深度300 km以下(图6);以及在西藏罗布莎铬铁矿的钌铱矿(OsIr)合金中,发现金刚石(Diamond)包裹体;并发现大量强还原环境的自然元素和合金矿物(自然铁、碳化硅)^[52],金刚石形成在高温高压环境($T > 2000^{\circ}\text{C}$, $P > 5$ GPa)。

最近,又在罗布莎铬铁矿的超高压矿物柯石英中,发现纳米级的立方晶系(Cubic)氮化硼(cBN)等特殊矿物包裹体,获国际新矿物委员会批准为新矿物,命名为青松矿(Qingsongite)(批准号:IMA No. 2013-30)。青松矿的硼(B)含量为48.54%,氮(N)含量为51.46%;矿物分子式为BN;矿物的晶体结构为立方晶系。实验结果表明,青松矿的形成温度为 1300°C ,压力为10~15 GPa,形成深度大于300 km^[53](图7)。

2.3.2 蛇绿岩型金刚石新类型的建立

地球上已知有两种产出的金刚石:产于大陆克拉通的“金伯利岩型金刚石”和产于板块俯冲带的“超高压变质型金刚石”。但是, Yang^[49]在西藏雅鲁藏布江、班公湖—怒江、缅甸密支那、新疆萨尔托海、内蒙古贺根山和俄罗斯乌拉尔全球5个造山带的11条蛇绿岩带中,均发现金刚石、碳硅石、柯石英等强还原超高压矿物(图8),认为这是蛇绿岩大洋地幔橄榄

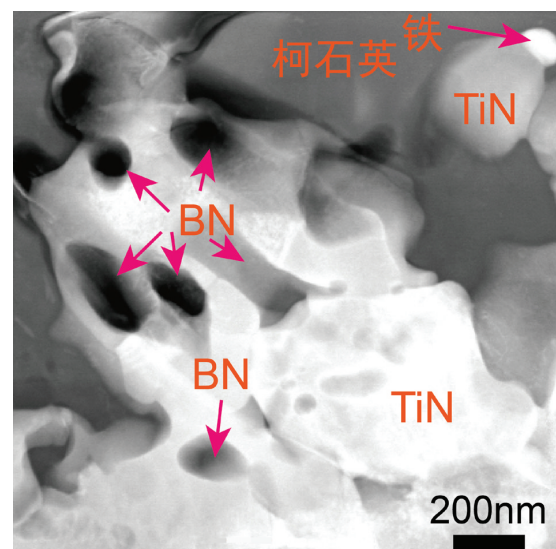


图7 西藏罗布莎铬铁矿中发现纳米级青松矿(BN)(据Dobrzhinetskaya^[53]修改)

Fig.7 Qingsongite (BN) included in the chromitite of the Luobusa ophiolite, Tibet (modified after Dobrzhinetskaya^[53])

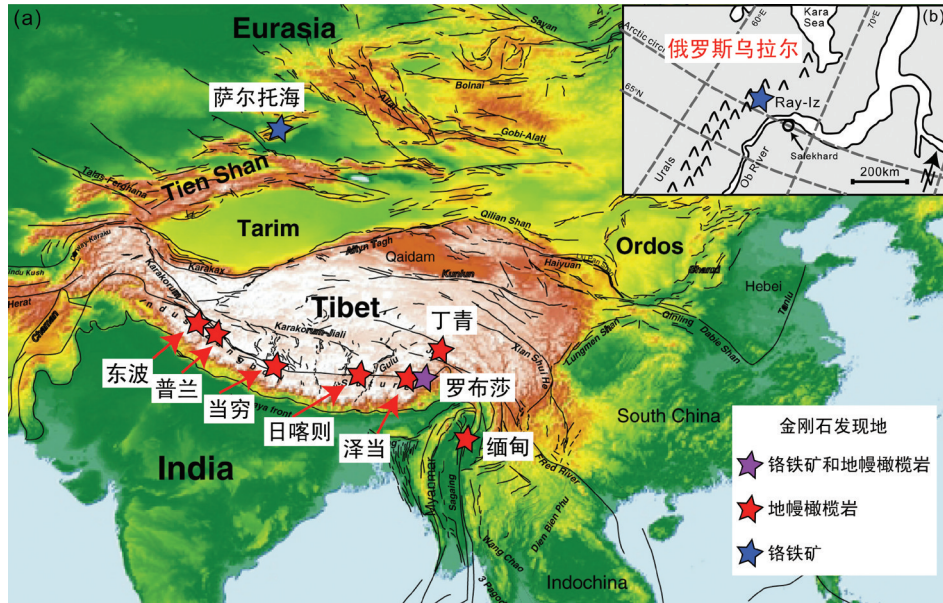


图 8 发现金刚石等深部矿物的蛇绿岩分布图^[49]

Fig. 8 Locations of ophiolite-type diamonds discovered in the Earth^[49]

岩中的一个普遍现象,是地球上金刚石的一个新的产地地质背景,并命名为“蛇绿岩型金刚石”。

研究表明,西藏和乌拉尔金刚石的C同位素值 $\delta^{13}\text{C}$ 变化于-18~-28之间,不同于金伯利岩和超高压变质金刚石的C同位素,表明蛇绿岩地幔橄榄岩和铬铁矿中金刚石的碳来源十分特殊(图9)。金刚石中矿物的包裹体为系列含锰的矿物组合,不同于金伯利岩和超高压变质金刚石中的矿物组合,与洋壳和蛇绿岩中锰矿床中的矿物组合可以对比。蛇绿岩型金刚石的特征概括如下:(1)均产在板块缝合带的蛇绿岩地幔橄榄岩中;(2)金刚石的晶体特征、C同位素和其中矿物包裹体等特征十分相同;(3)金刚石与其他深部矿物相伴,指示一个强还原的形成环境。蛇绿岩中产出的金刚石不同于金伯利岩型金刚石和俯冲带变质成因的金刚石,提出大洋岩石圈蛇绿岩地幔橄榄岩中存在一种新的金刚石产出类型,将其命名为“蛇绿岩型金刚石”(表1)。

2.3.3 提出铬铁矿深部成因和物质再循环新认识

根据金刚石形成在>150 km 深度;氮化硼、斯石英形成>300 km 深度,以及碳化硅-自然金属形成在深部极端还原环境的实验依据,表明在蛇绿岩地幔岩中可能普遍含深部矿物,深部矿物的成分和C同位素特征表明这些物质甚至可能来自早期俯冲

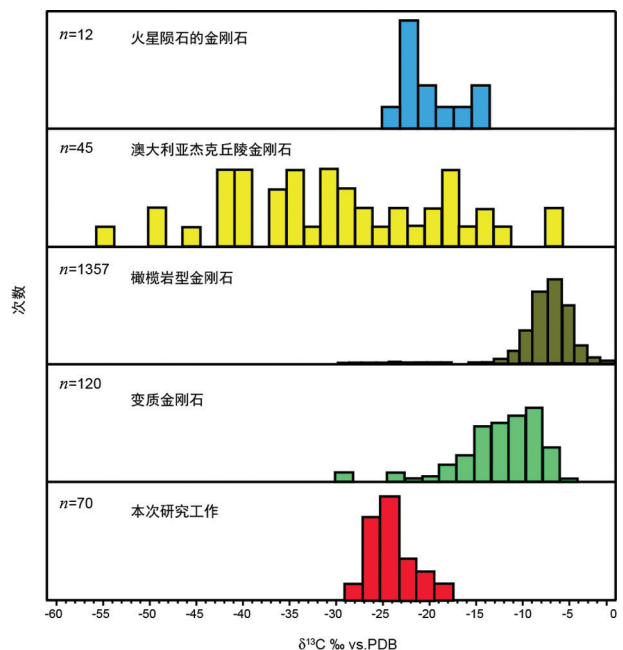


图9 西藏和俄罗斯乌拉尔的金刚石碳同位素SIM分析结果(红色为本研究成果,据 Yang^[49])

Fig.9 Histograms of $\delta^{13}\text{C}$ values for diamonds from the Tibet and Ray-Iz ophiolite and from other occurrences in the world for comparisons (after Yang^[49])

到地幔过渡带(410~660 km)的地壳岩片。在研究蛇绿岩中一系列深部(> 300 km)矿物的基础上,认

表 1 蛇绿岩型金刚石与其他类型金刚石的对比

Table 1 Comparison between ophiolite-type diamonds and other type diamonds

类型	蛇绿岩型金刚石	金伯利岩型金刚石	超高压变质型金刚石
赋存岩石	蛇绿岩中的地幔橄榄岩和铬铁矿	来自地幔的金伯利岩	榴辉岩和片麻岩等地壳岩石中
粒径大小	0.2~0.4 mm	宝石级 (多为 mm 级以上)	< 0.01 mm
包裹体类型	Ni-Mn-Co 合金, Mn 橄榄石, Mn 石榴石, Mn 尖晶石	Mg 石榴石, Mg 橄榄石, 硫化物, 铬尖晶石等	与金刚石相伴的矿物有镁方解石, 黑云母等壳源矿物
C 同位素($\delta^{13}C$)	-18~-28	-5~-10	-7~-15
产出构造背景	大洋岩石圈	大陆内部	板块俯冲带

为形成金刚石的C的物质来源于早期俯冲的岩石圈板片,反映地壳物质在深部地幔的再循环,并提出新的蛇绿岩铬铁矿成因的初步模式^[52]:从海沟深俯冲下去的地壳物质中会携带大量的流体和U、Th、Pb等放射性物质,到达地幔过渡带后,由于放射性生热和流体的作用,俯冲岩片被肢解和熔融,加入到周围的强还原流体中。同理,地幔物质在过渡带也将发生高度熔融,Cr元素从岩石中熔出进入熔融体。这些熔融体和流体随地幔柱上涌至过渡带顶部附近,随温度和压力降低,金刚石等超高压相矿物与铬铁矿均开始结晶。之后,携带金刚石的铬铁矿和地幔岩石随地幔柱上涌至浅部,深部强还原环境形成的矿物一部分被保留,如金刚石和青松矿等,另一部分发生改变,如斯石英被相对低压相的柯石英替代,柯石英从高Si的铬铁矿中出溶^[54]。认为高Si铬铁矿和超高压矿物斯石英、青松矿和金刚石形成在地幔过渡带的顶部,通过地幔柱和地幔对流被带至浅部;随着压力降低,斯石英在被退变成柯石英,铬铁矿出溶柯石英,青松矿和金刚石等超高压矿物被保留(图10)。

2.3.4 研究意义

板块构造理论认为蛇绿岩铬铁矿在浅部地幔形成,但是,深部矿物和原位金刚石的发现和证实其为“深部成因”;提出雅鲁藏布江“新特提斯大洋”的深地幔成因机制的新认识;提出一种新的金刚石产出类型—蛇绿岩型金刚石;开拓深部地幔作用研究的新方向。

该项研究成果发表在 *Geology*, *Elements*, *Gondwana Research*, *Lithos* 等期刊。斯坦福大学教授^[55]认为,“蛇绿岩铬铁矿中发现超高压矿物打破了传统蛇绿岩铬铁矿形成于高温、低压的洋中脊或弧

后扩张环境的传统观念的‘禁锢’”。蛇绿岩专家、美国科学院院士 Coleman^[56]文章认为以上成果“开启了研究岩石圈中蛇绿岩地幔岩演化的一个全新的研究领域”,“通过俯冲作用进入地幔的蛇绿岩橄榄岩经历的地壳物质再循环的证据给地球科学界提供了一个极具挑战性新的研究机遇!”最近杨经绥等申请的国际地学计划(IGCP 649)“Diamonds and Crustal Minerals in Ophiolitic Peridotites: Global Models for Mantle Dynamics”,获地科联(IUGS)批准并高度评价:“该项目是建立在地幔岩石中超高压矿物新发现之上的一个最新研究”,“是一个新的研究领域,必然将对板块构造系统如何运作及俯冲发生的时间框架提出新的理念”。最近,蛇绿岩中金刚石的研究又取得新成果和进展,与杨经绥合作的澳大利亚 Griffin 教授研究群体(572015)在EPSL发表论文报道从罗布莎铬铁矿中找到了金刚石,证实罗布莎金刚石不可能是混染的。在2015年美国GSA会议上,美国宝石学研究所(GIA)的研究系主任王五一教授领导的研究群体,报道了他们独立完成的对西藏金刚石的研究,认为“所有的证据指出,这些微粒金刚石与宝石级金刚石相比较,形成于不同的和极为特殊的地质环境”。

2.4 新特提斯洋盆俯冲新机制

拉萨地体经历了由于新特提斯洋北向俯冲导致的晚中生代安第斯型造山作用,和印度板块与欧亚板块碰撞导致的新生代喜马拉雅型造山作用。在南拉萨地体,广泛出露的冈底斯岩基形成于晚侏罗世至中新世,花岗岩的年龄为130~110 Ma、90~80 Ma、52 Ma和20 Ma,这些岩基被认为是俯冲型和碰撞型两期造山作用的产物。出露于南拉萨地体的高级变质岩长期被认为是拉萨地体的前寒武

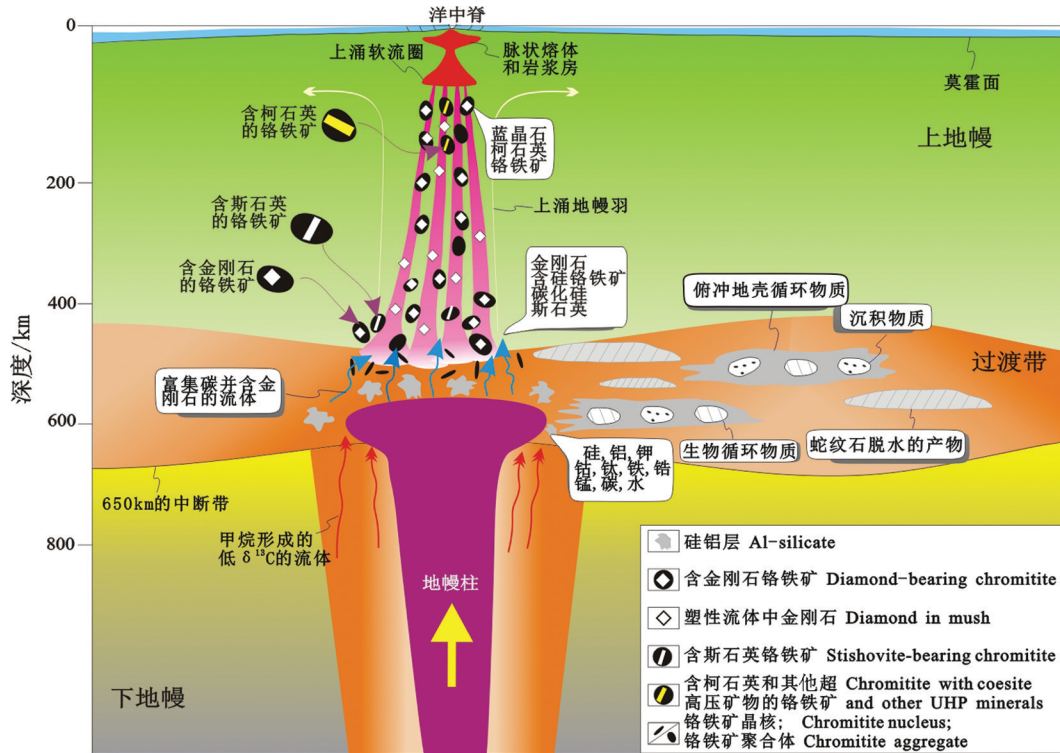


图10 地幔中的超高压矿物和铬铁矿的深部成因模式(据 Yang^[49])

Fig. 10 A conceptual model for the formation and occurrence of diamonds and associated ultrahigh-pressure minerals in the oceanic mantle(after Yang^[49])

纪结晶基底(念青唐古拉群),代表着印度大陆基底的物质组成,但是发现这些变质岩在空间上与中生代和新生代岩浆岩密切相关。新的研究表明,该区域高级变质岩已经解体,并曾经历了晚白垩纪和新生代变质作用^[58-59]。

2.4.1 晚白垩世新特提斯洋中脊的俯冲作用

发现南拉萨地体的晚白垩纪变质岩以高温、中压麻粒岩相为主^[58],这一期的变质作用与形成在高温甚至超高温(900~950 °C)条件下的埃达克质的紫苏花岗岩相关^[60]。高温岩浆岩与高温变质岩共存,被认为是洋中脊沿着大陆边缘俯冲的有利证据^[61-64]。在拉萨地体南部,白垩纪为主要的新的特提斯洋盆的俯冲期岩浆活动期,与之相关的岩浆岩包括钙碱性闪长岩、花岗闪长岩、花岗岩^[65-67]和埃达克质花岗岩^[68,69],这种非埃达克岩和埃达克岩共存也被认为是洋中脊俯冲的标志^[70-72]。此外,与紫苏花岗岩伴随的白垩纪变质作用多为中压型变质作用,其地温梯度约20温梯/km^[58],与形成在正常大陆和洋壳俯冲带中的高压变质作用不同在扩张的洋中脊俯冲带上发生的变质作用可以具有较高的地温梯度。如日本

位于环太平洋造山带上,这里发生的中压高温型变质作用被认为是洋中脊俯冲的结果^[73-75]。此外,对冈底斯紫苏花岗岩进行的系统流体包裹体研究发现,原生的流体包裹体由近乎纯的CO₂组成,具有较低的CO₂均一温度以及非常高的密度1.138~1.013 g/cm³(图12)。特提斯洋中脊俯冲可以导致起源于软流圈的CO₂和热通过构造板片窗释放出来,为埃达克质紫苏花岗岩以及同期麻粒岩相变质岩的形成提供高温、干的、富含CO₂的流体环境(图11)^[58,60,76]。

综上所述,拉萨地体南部经历了晚白垩世高温、中压的麻粒岩相变质作用,并伴随着广泛的弧岩浆活动,在新的特提斯洋中脊向北的俯冲过程中,形成了高温/中压型变质带和高温的紫苏花岗岩(图12)。澳大利亚地质学家Matthews^[77]在发表的文章中同意将Zhang等发现的晚白垩世埃达克岩作为新的特提斯洋中脊俯冲的证据。这一研究成果为冈底斯岩浆弧的深部组成与成因提供了新的认识。

2.4.2 冈底斯岩浆弧的深部建造

大陆地壳的生长主要是发生在活动大陆边缘和板内的岩浆作用,几乎80%~95%的后太古宙大陆

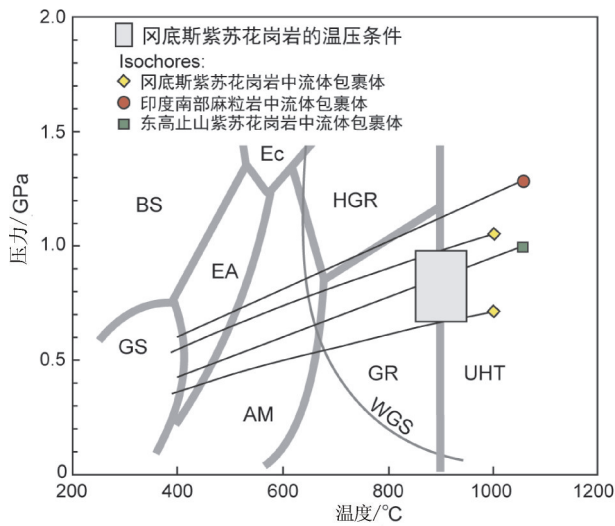


图 11 温度-压力图解, 表示出纯的 CO₂ 流体包裹体的等值线和本文估算出的捕获温压条件(灰色区域)(据 Zhang^[60])
 Fig. 11 P-T diagram showing the isochore ranges (the blue region) of primary CO₂ fluid inclusions and inferred trapping conditions (the pink box) (after Zhang^[60])

地壳形成与发生现今俯冲带的地质过程中。因此, 对俯冲带地质作用过程的研究为了解大陆地壳的增生提供了重要线索。尽管中、上地壳岩浆侵入岩已被广泛研究, 但我们对下部地壳形成的认识却因相关的深部地壳地质作用数据的缺失而受到阻碍。因此, 了解活动大陆边缘的深部岩浆作用和变质作用对大陆建造过程的认识十分重要。南部拉萨地体是青藏高原喜马拉雅造山带的一部分, 被人

们普遍认为是与新特提斯洋岩石圈北向俯冲有关的安第斯型汇聚边缘, 同时也是与印度-亚洲大陆碰撞有关的新生代造山作用的典型代表。长期以来, 绝大多数研究都聚焦于冈底斯岩基为核心的巨大而多样的中、新生代岩浆岩, 而冈底斯岩浆弧深部地壳的高级变质岩很少受到关注。晚新生代南部拉萨地体地壳快速抬升和剥蚀致使东喜马拉雅构造结处西侧的拉萨地体高级变质岩和相关深层侵入岩暴露出来。这些岩石为我们更好地认识和了解冈底斯岩浆弧的中、下地壳提供了一个窗口。

位于东喜马拉雅构造结西侧的拉萨地体的林芝杂岩由冈底斯岩基和念青唐古拉群变质岩组成, 侵入岩类型多样, 包括辉长闪长岩、闪长岩、花岗闪长岩、花岗岩和淡色花岗岩(图 13), 花岗岩以岩基、岩株、岩墙和岩脉的形式出露, 绝大多数侵入岩墙平行或近于平行高级变质岩的面理。花岗岩呈块状构造, 表现出不同程度的面理组构。这些花岗岩具俯冲型和碰撞型的结晶年龄(120~20 Ma), 且多呈侵入接触关系。变质沉积岩主要包括变泥质片岩、副片麻岩和角闪岩, 其次有石英岩、钙质硅酸盐和大理岩。这些岩石经历了强烈的变形和麻粒岩相变质作用, 致使岩石发生部分熔融和混合岩化, 大量长英质脉、淡色花岗岩脉和伟晶岩脉等深熔岩脉贯入。含石榴石白云母淡色花岗岩脉是含矽线石石榴云母片岩或含蓝晶石石榴云母片岩部分熔融的产物。

印度-亚洲大陆碰撞前的新特提斯洋岩石圈向

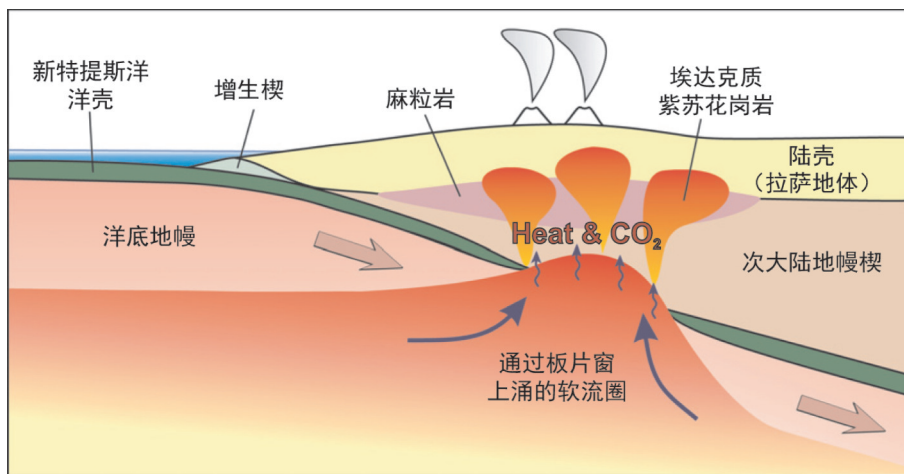
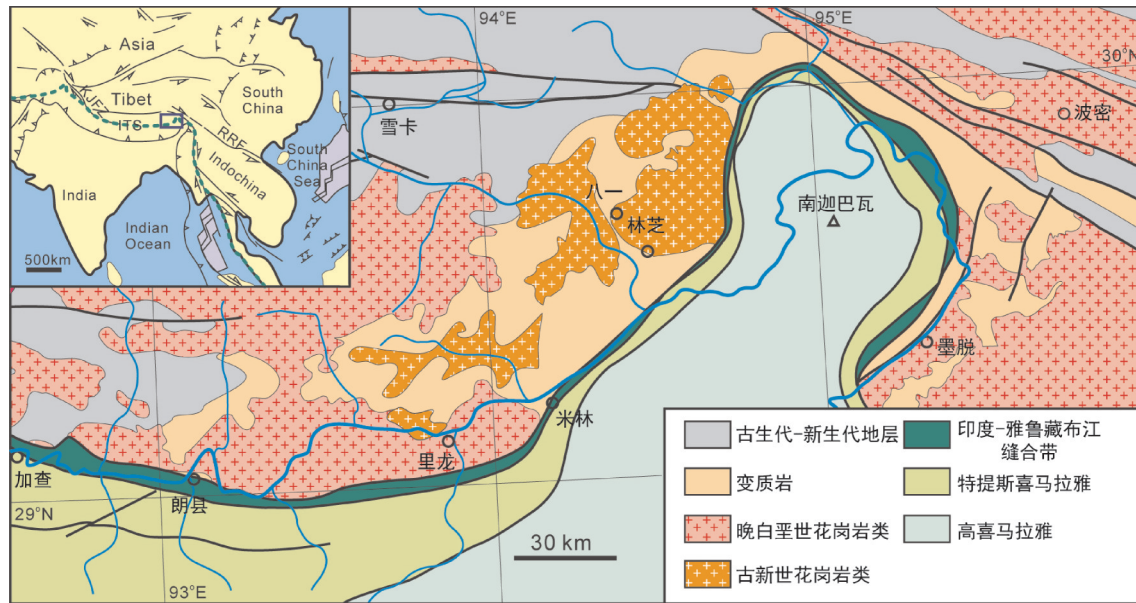


图 12 新特提斯洋洋中脊俯冲构造模式图(据 Zhang^[60])
 Fig. 12 Tectonic model for the origin of the Gangdise charnockites (modified after Zhang^[60])

图13 东喜马拉雅构造地质简图(据 Zhang^[60])Fig.13 Schematic geological map of the Eastern Himalayan Syntaxis (After Zhang^[60])

北俯冲于拉萨地体之下,形成了冈底斯岩浆弧。100~85 Ma的持续俯冲作用导致大量白垩纪侵入岩体和火山岩形成,至80~70 Ma的岩浆活动静止。一些学者认为,造成岩浆停止的原因是新特提斯洋板片的低角度或近水平俯冲,到古新世岩浆活动加剧,被认为是俯冲的新特提斯洋板片回卷或转变为陡俯冲的结果^[78,65,68~69,79]。板片回转会导致地壳强烈缩短(>40%)^[80],地幔楔软流圈上涌,改变地幔楔热流结构^[81]。板片回转同样会造成幔源岩浆流汇于后撤板片上方,为拉萨地体南部的变质作用、部分熔融和岩浆作用提供热源^[80]。Zhang^[82]的研究进一步表明,古新世冈底斯岩浆弧增生造山以强烈深成侵入作用、同期区域性麻粒岩相变质作用和地壳深熔作用为特征。基于最新数据和此前发表的数据推断,晚中生代水平俯冲的新特提斯洋板片的回转造成了挤压造山体制,地幔楔软流圈角流的增加和大量幔源岩浆涌入。因此,南部拉萨地体的缩短、沉积岩深埋和下地壳大规模加热造成冈底斯岩浆弧下地壳的麻粒岩相变质作用,以及I型和S型花岗岩岩浆作用(图14)。

拉萨地体南部广泛分布的中、新生代冈底斯岩浆弧,是大陆地壳生长的产物。张泽明等^[82]发现,与冈底斯岩基共生的高级变质岩同样形成在中、新生

代,与中、基性深层侵入岩一起构成了冈底斯岩浆弧的中、下地壳。研究表明,幔源岩浆的侵入和不断增生导致了岩浆弧地壳的加厚和加热,发生了与侵入岩同时期的高压高温麻粒岩相变质作用和深熔作用,形成了S型花岗岩,显示出增生造山带地壳生长与岩浆和变质作用之间的成因联系^[60,82,64]。晚白垩世花岗岩基根部的辉长岩经历了稍晚期的麻粒岩相变质作用和近同期的深熔作用,构成了岩浆弧的下地壳。变辉长岩、闪长岩和花岗闪长岩具有大陆岩浆弧新生地壳的地球化学特征和原始岩浆分异趋势,其中辉长岩为堆晶岩,而闪长岩和花岗闪长岩是演化岩浆的结晶产物,它们一起构成了新生的地壳剖面。这些岩石整体上具有安山岩成分,为大陆地壳生长的“安山岩模式”提供了重要支持^[83]。国际著名青藏高原研究专家、英国牛津大学 Searle 教授等^[84]在国际核心期刊(Journal of the Geological Society)发表的论文中评价到:在拉萨地体东南部发现的高级变质岩,是目前已知的拉萨地体深部地壳演化的唯一记录,对于揭示青藏高原下地壳的组成有重要意义。

2.5 印度-亚洲碰撞的深熔作用

前人的工作表明,大量淡色花岗岩在23 Ma之前侵位于特提斯喜马拉雅、藏南拆离系和主中央逆

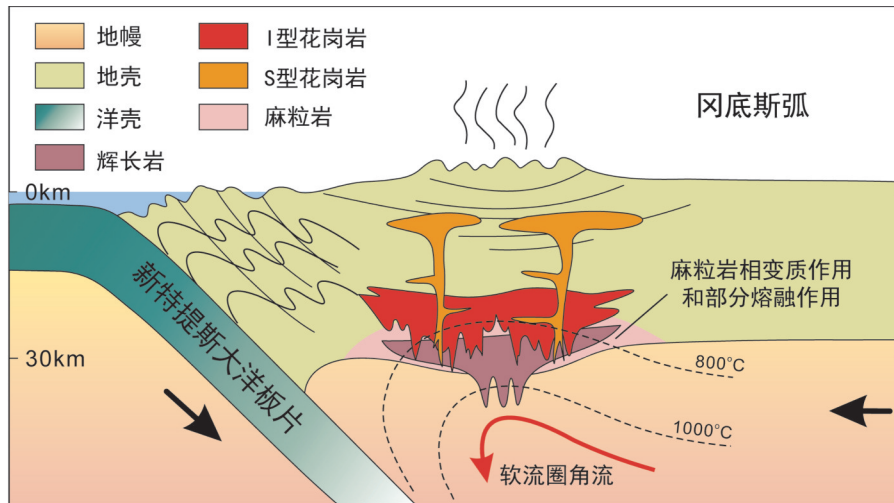


图 14 冈底斯岩浆弧东南部古新世构造模式图(据 Zhang^[82])

Fig.14 Paleocene tectonic model for the southeastern Gangdise arc (after Zhang^[82])

冲断裂中^[85-94]。但是,近年来在特提斯喜马拉雅的拉轨岗日花岗片麻岩穹隆群发现 44~35 Ma 和 35~24 Ma 的淡色花岗岩。

曾令森等^[95]识别出印度-亚洲陆陆碰撞以来的早期岩浆事件的记录。并围绕喜马拉雅高级变质岩石快速折返与地壳深熔作用之间的构造动力学关系,进行系统的深熔事件的岩石学、地球化学和同位素年代学研究,揭示确定喜马拉雅造山带最早碰撞岩浆事件的特征。

2.5.1 确定喜马拉雅造山带最早碰撞岩浆事件

Zeng^[95]发现始新世中-晚期(44~35 Ma)的淡色花岗岩为高 Sr/Y 比二云母花岗岩、淡色花岗岩和斑状淡色花岗岩具有相似的 Sr-Nd-Hf 同位素组成,淡色花岗岩和淡色花岗玢岩经历了强烈的岩浆演化后期的流体作用和钙长石结晶作用,而二云母花岗岩是变泥质岩白云母部分熔融的产物。Wang^[23]还揭示高喜马拉雅聂拉木地区含矽线石混合岩的锆石年龄为 39.7~34 Ma,代表了局部熔融的时间。

曾令森等确定始新世深部地壳深熔作用形成三套岩石和地球化学特征各异的而时间相似的花岗质岩石,包括高 Sr/Y 比二云母花岗岩,淡色花岗岩和淡色花岗玢岩,为同属于始新世晚期青藏高原主碰撞时中下地壳部分熔融产物^[96](图 15),并且提出二云母花岗岩浆为缩短增厚基性下地壳部分熔融的产物,早期深部地壳部分熔融是调制深部构造

过程的重要作用^[97,98]。这些研究成果填补了喜马拉雅造山带早期构造岩浆事件的空白,为深化理解碰撞造山带碰撞早期岩浆作用提供了典例。

2.5.2 特提斯-喜马拉雅地体拉轨岗日穹隆的中新世的淡色花岗岩的成因

在雅拉香波片麻岩穹隆中,发现花岗斑岩和典型的淡色花岗岩形成于 17~20 Ma,拿日雍错穹隆中的淡色花岗岩形成时代约为 21 Ma 和 18 Ma,马拉山二云母花岗岩的形成时代为 17 Ma 左右,佩枯错淡色花岗岩形成于 28 Ma。全岩地球化学和同位素地球化学数据揭示马拉山岩体所代表的部分熔融为水致部分熔融的结果;佩枯错淡色花岗岩是由含电气石淡色花岗岩、含黑云母淡色花岗岩和粗粒含石榴石淡色花岗岩组成的复合岩体,其原岩经历了(33.6±0.6) Ma 的变质作用和深熔事件;含黑云母淡色花岗岩形成于(19.8±0.5) Ma;含电气石和含黑云母淡色花岗岩但都包含有大量年龄为 480 Ma 左右的碎屑锆石。在主量元素、微量元素和同位素(Sr, Nd 和 Hf)组成上,这三类淡色花岗岩具有明显的差异性,全岩初始 Sr 和 Nd 和锆石原位 Hf 同位素组成特征显示电气石淡色花岗岩的 Sr、Nd 和 Hf 同位素比值都高于含黑云母淡色花岗岩,表明它们不同源岩和不同部分熔融反应共同作用的结果(图 16~图 18)。

麻迦穹隆中淡色花岗岩的形成时代和地球化学特征表明:(1)淡色花岗岩为富钾过铝质花岗

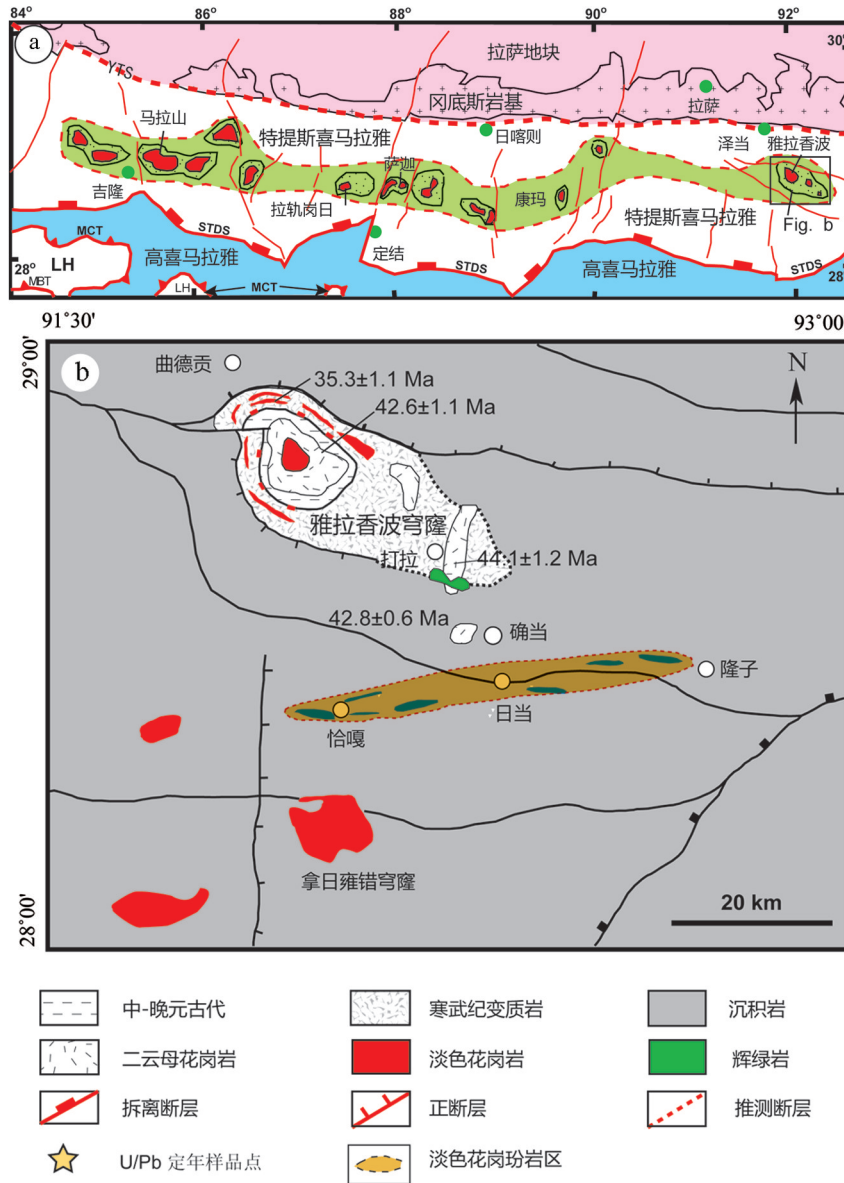


图 15 喜马拉雅造山带雅拉香波穹隆地区地质简图(据 Zeng^[97])

Fig.15 (a) Simplified geological map of the Himalayan orogenic belt, southern Tibet; (b) simplified geological map of the Yardoi area (after Zeng^[97])

岩;(2)淡色花岗岩是变泥质岩白云母脱水部分熔融的产物;(3)淡色花岗岩的初始 Sr 同位素比值(0.79744~0.806372)高于喜马拉雅其他地区花岗岩,表明由古老地壳源区重熔而来;(4)淡色花岗岩可能代表着花岗岩终期岩浆活动的时代;(5)麻迦淡色花岗岩形成时间跨度较长(至少 11.5~9.7 Ma);(5)锆石核部均给出了>431.2 Ma 的古老年龄,与高喜马拉雅以及北喜马拉雅其他地区的花岗岩和高级变质岩具有可对比性。通过年代学结果可以看出,可能起因于与南北向裂谷活动相关的构造减压

作用。

结合已有的数据,进一步证明藏南喜马拉雅造山带大约 35 Ma 以来的深熔作用促使了 STDS 的启动,以及喜马拉雅造山带由逆冲增厚转化为伸展减薄,并引发变泥质岩发生大规模的减压部分熔融。

2.5.3 特提斯喜马拉雅带的基性岩浆作用

曾令森等还揭示了特提斯-喜马拉雅带中 4 期基性岩浆作用:晚二叠世(约 270 Ma)、早侏罗世(190~200 Ma)、早白垩世(130~135 Ma)和晚白垩世(约 70 Ma)。

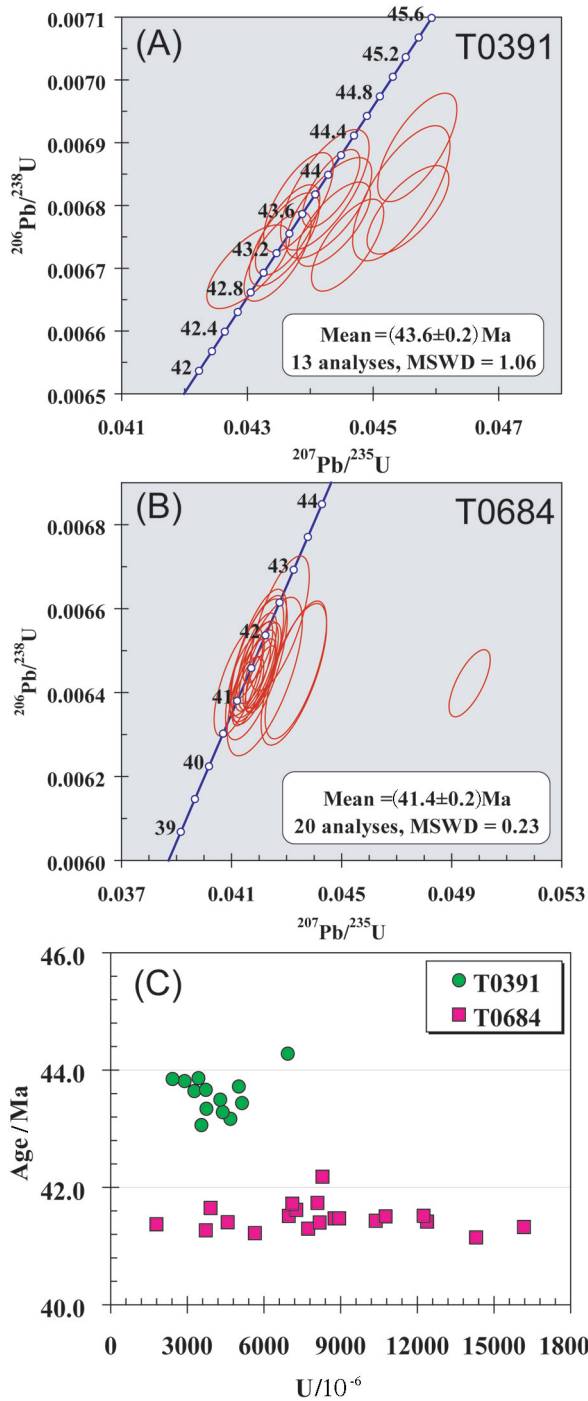


图16 雅拉香波—隆子地区二云母花岗岩(A)和淡色花岗玢岩(B)铀石U—Pb定年结果(据Zeng^[97])
 Fig.16 U—Pb concordia diagram for two—mica granite T0391 (A) and porphyritic leucogranite T0684 (B) in the Yardoi—Longzi area (after Zeng^[97])

1)晚二叠世基性岩浆作用表现为大规模的大陆溢流玄武岩和辉绿岩体,具有富集LREE,亏损

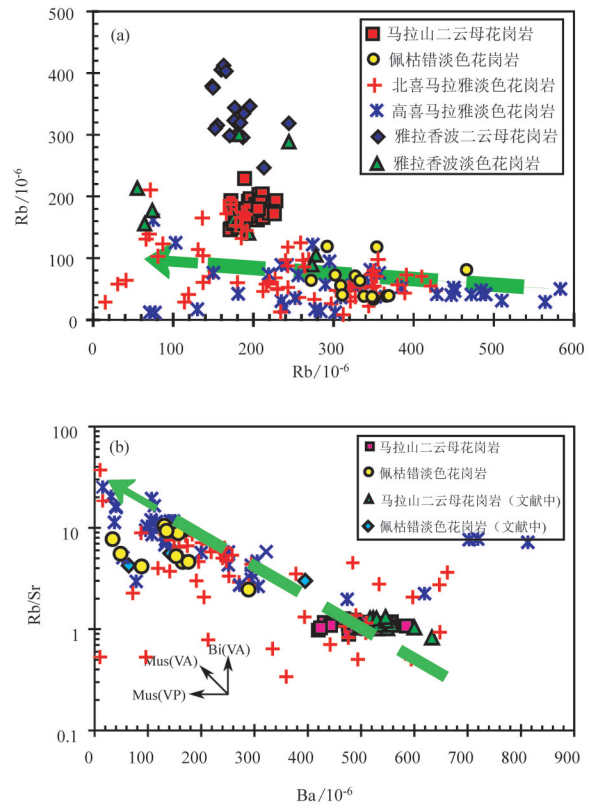
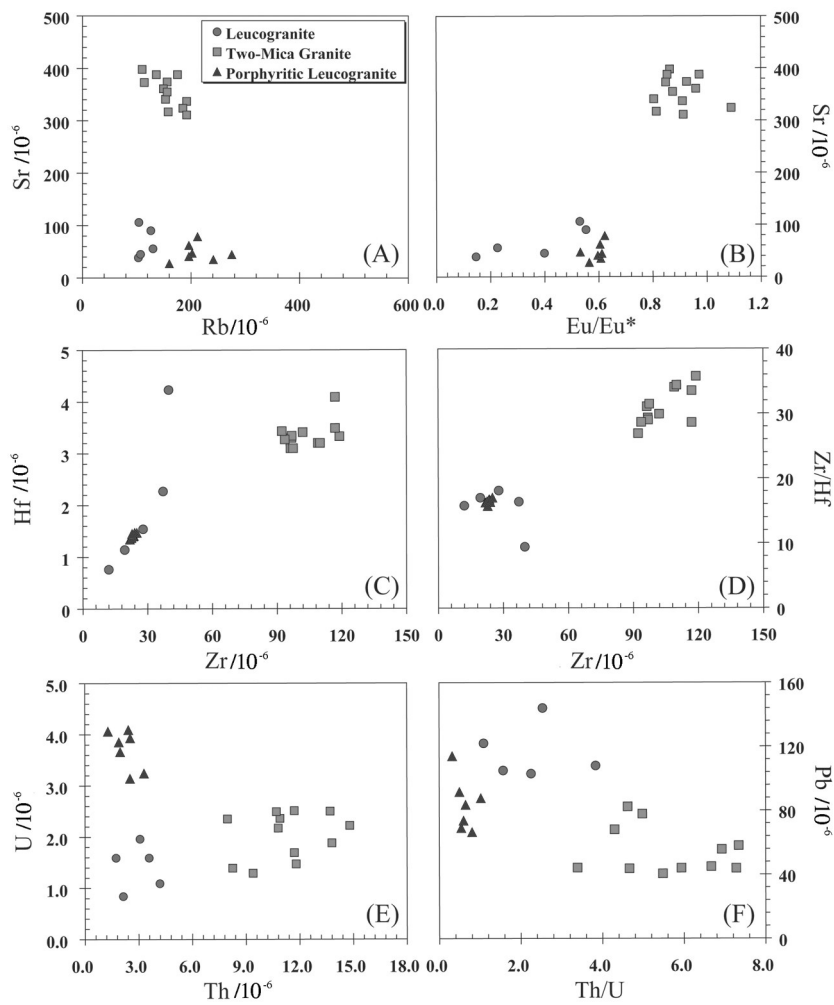


图17 特提斯喜马拉雅带淡色花岗岩元素地球化学特征(据Gao^[98])
 Fig.17 Trace element geochemistry of the leucogranites in the Tethyan Himalaya belt (after Gao^[98])

HREE; 高场强元素含量较高;较高的Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t) = 0.7063\sim 0.7078$)和Nd ($\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -1.1\sim -2.4$)及锆石Hf ($\epsilon_{\text{Hf}}(t) = +2.5\sim +3.9$)同位素组成等特征,是冈瓦纳大陆北缘裂解和新特提斯洋初始张开时深部岩浆作用的产物。

2)早侏罗世(190~200 Ma)基性岩浆岩以较大规模辉绿岩体的形式侵入到晚三叠世页岩和细砂岩中,形成时代与冈底斯岩基南缘和中部的花岗质岩石相当,具有与MORB相似的REE,较高的地幔相容元素(Cr、Ni和Co等),较低Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t) = 0.7046\sim 0.7058$)和较高Nd ($\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +8.2\sim +9.5$)同位素组成等特征,是与新特提斯洋扩张相关、洋内岩浆作用的产物。

3)早白垩世(130~135 Ma)基性岩分布较广泛,从雅拉香波穹隆到拉轨岗日穹隆以西都有出露,主要以辉绿岩脉或岩体的形式侵入到侏罗纪以前的特提斯沉积岩系中,具有富集LREE、亏损HREE和

图18 雅拉香波地区淡色花岗岩元素地球化学特征(据Zeng^[97])Fig.18 Trace element characteristics of leucogranite, two-mica granite and porphyritic leucogranite from the Yardoi area (after Zeng^[97])

地幔相容元素较低等特征;在部分地区,辉绿岩规模较大,见证了印度—欧亚大陆碰撞相关的缩短变形,形成于规模较大的褶皱和布丁,代表了与印度—澳大利亚—南极洲大陆裂解相关的岩浆作用。

4)晚白垩世基性岩浆作用表现为较大规模的辉绿岩体,侵入到早白垩世甲不拉组页岩、砂岩和碳酸岩中,具有介于MORB和OIB之间的REE、地幔相容元素,较低的锆石 $Hf(\epsilon_{Hf}(t)=-1.0\sim-5.5)$ 等地球化学特征,可能代表了印度—欧亚大陆碰撞初期,俯冲新特提斯洋板片断离引发的印度板块深部地幔熔融作用。

2.6 建立喜马拉雅三维碰撞造山机制和折返全过程

高喜马拉雅地体的折返机制是全球关注的热点。长期以来,人们将来自地壳中一下部、而又急剧上升的、以高级变质、高温韧性变形和深熔作用

为特征的高喜马拉雅单元当作“热碰撞造山带”的典型,而特提斯—喜马拉雅、低喜马拉雅和次喜马拉雅则为“冷碰撞造山带”。喜马拉雅的热碰撞造山的证据完好保存在来自中下地壳的构造变形、变质和深熔效应的记录中,它们将提供高喜马拉雅从深部到浅部折返、侵位和挤出机制的过程。长期以来,高喜马拉雅造山事件一直锁定为受主中冲断裂和藏南拆离系(23~17 Ma)制约的“挤出”(图19),提出多种折返挤出的二维构造模式:如楔状挤出^[99,100]、隧道流^[101-103]和构造楔^[104-106]等。

许志琴等^[107]在前人研究基础上,提出在高喜马拉雅地体的东—西1800 km 长的广大地段,普遍存在平行造山方向(近东西向)的线理轨迹,如东喜马拉雅的错那和亚东地区^[108],中喜马拉雅的聂拉木和吉隆地区^[109,110],Annapurnas 和 Manaslu^[111,112],

Gangotri^[113]以及西喜马拉雅的普兰(Gurla Mandhata地区)^[114,108]。另外,发现在东喜马拉雅构造结,高喜马拉雅(GHC)中的片麻岩和糜棱岩中的拉伸线理逐渐转向NE^[108](图19)。

通过在藏南错那、亚东、聂拉木、吉隆和普兰地区的野外填图、微构造分析、石英的EBSD测量和年代学的综合研究,发现在GHC中的平行造山的韧性拆离构造具有缓倾的面理和渗透性的近EW向的拉伸线理。在东喜马拉雅的亚东地区,顶面的向东和北东的剪切指向,锆石的SHRIMP U-Pb年龄揭示了亚东剪切带的起始年龄在28~26 Ma,黑云母和白云母的⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄表明韧性变形在13~11 Ma停止。在中喜马拉雅的聂拉木和吉隆地区,顶面的剪切指向向东和向西同时存在表示纯剪切特征;锆石边的LA-MC-ICP-MS的U-Pb年龄揭示了聂拉木剪切带高角闪岩相阶段的活动年龄在28~27 Ma,聂拉木地区STD下盘变形淡色花岗岩的年龄是17 Ma^[89,94],吉隆地区STD和其下盘黑云母和白云母的

⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄反映GHC在中新世中期(16~15 Ma)快速折返^[115];因此,聂拉木剪切带和亚东剪切带可能同时开始活动,其东西向剪切也持续到STD活动的中新世中期。在西喜马拉雅的普兰地区,顶面向西的普兰剪切带的锆石SHRIMP U-Pb测年确定为21.8~15.5 Ma,年轻的年龄(16 Ma)与Gurla Mandhata穹隆的淡色花岗岩侵位的年龄^[92]一致。与东喜马拉雅的亚东剪切带和中喜马拉雅的聂拉木剪切带比较,普兰剪切带起始时间晚了4~6 Ma,但是早于STD的剪切作用和淡色花岗岩的侵位。因此,确定了平行造山的韧性伸展构造形成时限于28~16 Ma。

这里我们提出一个用于解释高喜马拉雅(GHC)自晚渐新世折返的新的三维(3D)挤出模式。如图20所示,剪切组构的剪应力方向在东喜马拉雅是指向东,但在喜马拉雅中部向东和向西两种剪切指向都有出现,在西喜马拉雅的普兰地区则是指向西,在Gangotri地区也是顶面向东。假如在渐新

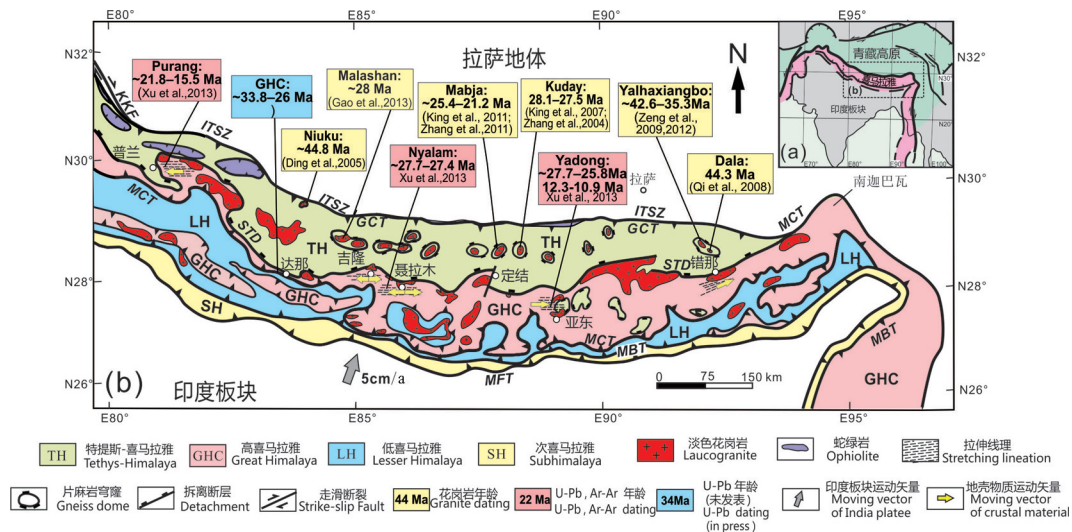


图19 喜马拉雅造山带地质简图(改自[117,104,118])

GHC—高喜马拉雅结晶岩系;LH—低喜马拉雅;SH—次喜马拉雅;TH—特提斯喜马拉雅;LHCN—低喜马拉雅结晶岩片;ITSZ—印度—雅鲁藏布缝合带;GCT—大反冲断裂;KF—喀喇昆仑断裂;MBT—主边界断裂;MCT—主中央冲断裂;MFT—主前缘冲断裂;MKT—喀喇昆仑主冲带;STD—藏南拆离系;References for the STD: Khula Kangri^[85,86], Wagye La^[93], Dinggye^[94], Rongbuk, Nyalam^[89,94], Everest^[91], Shisha-Pangma^[90], Manaslu^[87], Annapurna Range^[88], and Gurla Mandhata^[92];References for the MCT from east to west: Arunachal Himalaya^[6], Bhutan^[103], Sikkim^[119], Kathmandu nappe^[120,121], Annapurna Range^[88]

Fig. 19 Simplified geological map of the Himalayan orogen (modified after references [117, 104, 118])

GHC—Great Himalaya Complex; LH—Lesser Himalaya; SH—Subhimalaya; TH—Tethys-Himalaya; LHCN—Lesser Himalaya Complex; ITSZ—Indus-Yaluzangbu suture zone; GCT—Great Couther Thrust; KF—Karakunlun Fault; MBT—Main Bonded Thrust; MCT—Main Central Thrust; MFT—Main Frontal Thrust; MKT—Main Karakunlun Thrust; STD—South Tibet Detachment; References for the STD: Khula Kangri^[85,86], Wagye La^[93], Dinggye^[94], Rongbuk, Nyalam^[89,94], Everest^[91], Shisha-Pangma^[90], Manaslu^[87], Annapurna Range^[88], and Gurla Mandhata^[92]. References for the MCT from east to west: Arunachal Himalaya^[6], Bhutan^[103], Sikkim^[119], Kathmandu nappe^[120,121], Annapurna Range^[88]

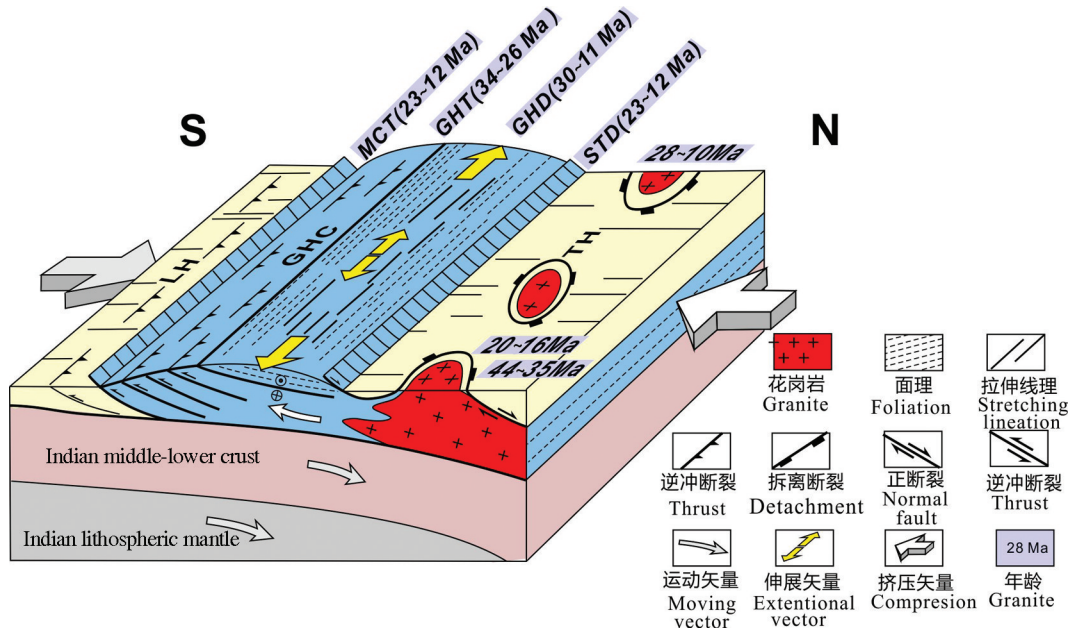


图20 高喜马拉雅三维挤出模式

TH—特提斯—喜马拉雅地体;GHC—高喜马拉雅地体;LH—低喜马拉雅地体;STD—藏南拆离系;MCT—主中逆冲断裂;GHD—高喜马拉雅拆离系;GHT—高喜马拉雅逆冲系;Indian middle-lower crust—印度中下地壳;Indian lithospheric mantle—印度岩石圈地幔

Fig. 20 Three dimensional extrusion model for Great Himalaya

TH—Himalaya terrane;GHC— Great Himalaya terrane;LH—Lesser Himalaya terrane;STD—South Tibet Detachment;MCT—Main Central Thrust GHD—Great Himalaya Detachment; GHT—Great Himalaya Thrust

世发生地壳增厚,说明喜马拉雅中部地壳厚度最厚或者地形最高,并且由于区域地壳厚度梯度力产生东西向的重力垮塌。同时代的埃达克岩和西藏中部南北向的岩墙说明中到晚始新世藏南和原始喜马拉雅出现了地壳增厚现象^[116]。可能喜马拉雅山脉中部印度和亚洲之间的正面碰撞挤压导致了最厚地壳的出现,以及在渐新世晚期最高地势的形成。

侧向梯度压力会驱动流变层之间的解耦机制的发生。例如:GHC中地壳韧性岩石与上层脆性沉积地层之间。东喜马拉雅的亚东剪切带为这种解耦提供了一个很好的例子。在喜马拉雅中部,侧向压力梯度变化小并且南北向的挤压强烈,在垂向压平作用下相对较弱的GHC岩石可向任意方向流动。东西向拉伸可以导致重要的构造剥蚀,然后触发并伴随着中地壳部分熔融和GHC在MCT和STD之间的向南折返。因此,平行于造山带的伸展构造的年龄预示着区域埋深/增厚到折返的转换时代。

形成构造剥蚀的向南隧道流驱动力是由于平行造山带的伸展作用(侧向地壳厚度梯度变化导致重力垮塌)而不是聚集在喜马拉雅表面的剥蚀^[101]。

新3D挤出模式可以很容易地解释为什么高喜马拉雅上部出现了普遍的拉伸变形,并且可以很好地解释构造和同位素年代的数据。然而,这种新模式仍然存在着一些难以解决的问题。首先,虽然锆石U-Pb定年的年龄数据表明亚东和聂拉木剪切带比普兰剪切带出现得早,但尚不能确定喜马拉雅西部侧向流动滞后的机制。其次,平行造山带的重力垮塌为什么在晚中新世终止,并且发生的位置尚不能确定。在西喜马拉雅的Gangotri地区,高喜马拉雅发育顶面向东的剪切。显然,要进一步完善这一新模式,还需要更多的关于构造和同位素年代学的数据。这些问题的解决有助于我们查清喜马拉雅构造结物质运移通道,折返速率和侵蚀率沿走向的变化。

新的研究表明,由于侧向地壳厚度梯度,产生平行造山方向的重力裂陷而致^[108]。根据在高喜马拉雅杂岩中存在45~36 Ma的岩浆事件,为高喜马拉雅的初始挤出提供热源^[122,95];西尼泊尔-高喜马拉雅中,还发现大型的向南剪切的韧性高温逆冲剪切带,形成于31~26 Ma(未发表),具有自北向南扩展迁移的趋势,高喜马拉雅单元的上部存在形成于28

Ma以来的平行E-W向造山带的近水平高温韧性伸展剪切带,我们提出高喜马拉雅的形成经历了(1)46 Ma以来的早期局部熔融;(2)31~26 Ma的高温韧性逆冲剪切;(3)28 Ma的平行伸展式高温剪切^[108];(4)23~13 Ma的高喜马拉雅韧性挤出的三维动力学过程(图21)。

2.7 青藏高原东南缘物质逃逸的新机制

青藏高原被许多大型走滑断裂所切割,这些大型断裂是亚洲岩石圈大型陆块从青藏高原中部向东和南东的华南及印支陆块运动的主要原因^[123-125,2]。这种水平方向的大陆陆块逃逸与青藏高原水平方向的扩展有关,从而保证了在喜马拉雅和藏南的挤压构造应力顺时针绕过喜马拉雅东构造结向青藏高原东南部转换(图21)。前人对于青藏高原东南缘的物质逃逸模型主要有两种:(1)与时间有关的,相邻岩石圈块体之间的局部走滑^[2],假设刚性块体的侧向挤出

主要受控于岩石圈走滑剪切带的活动^[2,126];(2)地壳的均匀黏性增厚作用,使得下地壳形成隧道流^[127,124],致使地壳深部物质可以经过几百 km 甚至 1000 km 距离的流动^[127,124]。

青藏高原东南缘(即印度支那陆块)由4条主要形成于35~15 Ma的大型近垂直的走滑断裂:哀牢山—红河左行走滑断裂、澜沧江左行/右行走滑断裂、高黎贡右行走滑断裂和三盖—那邦右行走滑断裂组成,并使印度支那陆块北部自东向西分划为思茅、保山和腾冲三个侧向挤出地体。许志琴团队对青藏高原东南缘被东部的NW-SW走向的哀牢山—红河左旋走滑剪切带(ARRSZ)^[128-130]和西部的N-S走向的实皆右旋走滑剪切带^[131,132]所包围的印支挤出地体进行了野外填图、构造分析和年代学研究。揭示了出露在高黎贡走滑剪切带以西的腾冲地体中面理化的前寒武纪基底岩石和晚白垩世—

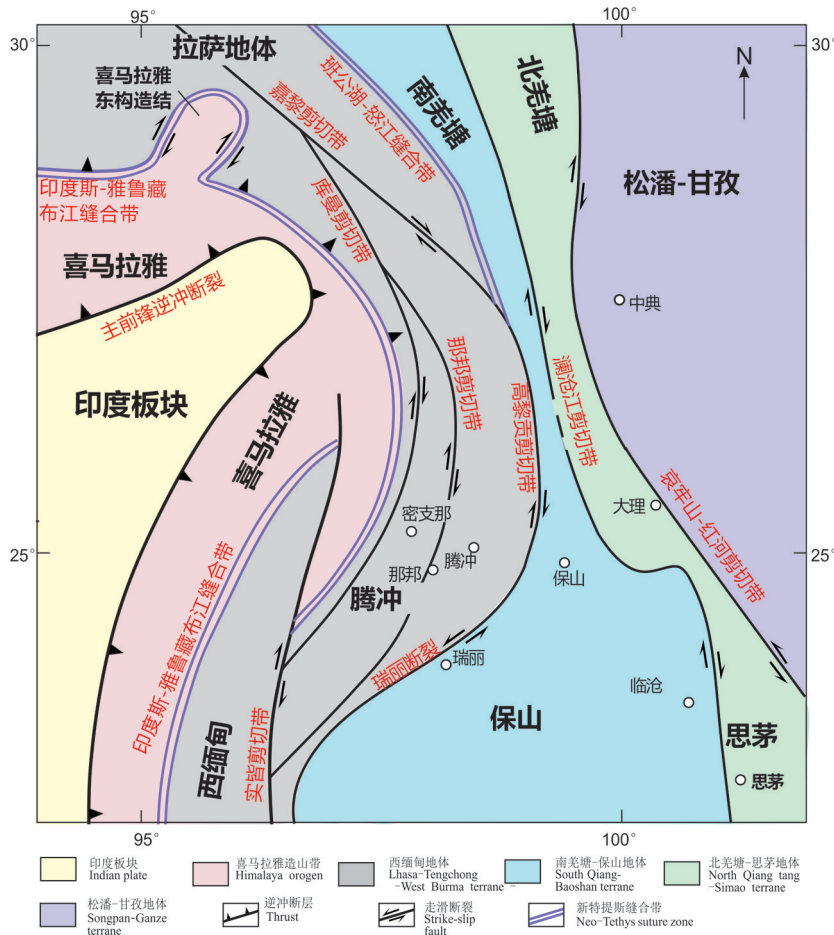


图21 青藏高原东南缘构造示意图
Fig. 21 Schematic tectonic map of southeast Tibet

早古新世的花岗岩基(图21,图22),4条近NNE-SSW延伸的片麻岩穹隆是以高级变质岩和前运动学的花岗岩基为核部,以及以顶部向NE方向拆离和NNE-SSW向的右行走滑剪切带为边界。发现晚古新世—早中新世水平的拆离剪切带在运动学上与陡倾的走滑剪切带是相关的。从LA-ICP-MS获得的锆石U-Pb年龄和云母-角闪石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄表明,水平的拆离剪切带形成在 $>35\sim 15\text{ Ma}$,腾冲地体西缘的那邦右行走滑剪切带形成在 $41\sim 19\text{ Ma}$;高黎贡右行走滑剪切带在 $32\sim 10\text{ Ma}$ 经历了角闪岩相-绿片岩相变形变质条件。腾冲地体中的3条走滑剪切带(高黎贡、那邦和盈江)的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 角闪岩相似年龄表明,在中地壳深度的这些剪切带快速折返以及腾冲地体向SW挤出的同时性。

腾冲地体中应变几何学和剪切带运动学可以被解释为 41 Ma 以来围绕印度板块东北犄角的一条直立轴(喜马拉雅东构造结“南迦巴瓦”)的各向异性岩石圈的褶皱(图23)。腾冲地体西部的一系列走滑剪切带是腾冲地体顺时针快速旋转而产生的次生韧性断裂。晚古新世以来,走滑剪切带由于腾冲地体围绕原始东喜马拉雅构造结的挤出和顺时针旋转,与此同时韧性拆离断裂在沉积盖层之下产生中地壳解耦和快速向SW的挤出。

图22显示前寒武纪高级变质岩石为早白垩世—早始新世花岗岩基(核部为花岗岩,边部为花岗片麻岩组成的片麻岩穹隆)侵入,上部为古生代地层覆盖;变质岩中发育顶部向东北剪切的水平拆离与两侧为右行走滑剪切带。

作者在进一步厘定青藏高原东南缘大规模走滑断裂的活动时限和运动学特征的基础上,确定 $40\sim 35\text{ Ma}$ 以来,自西向东的那邦、盈江、高黎贡—嘉黎右行走滑、澜沧江右行/左行走滑、金沙江—红河和鲜水河左行走滑等断裂的活动的向东迁移,以及西部以右行走滑为主,和东侧以左行走滑为主的运动学特征。发现在走滑断裂之间所夹持的地体(腾冲、保山、思茅)中,近水平的韧性拆离构造的普遍存在于变质基底和盖层之间,它们的构造产出、运动指向在空间上与两侧的走滑断裂相协调,与走滑构造的活动时限具有同时性和空间上的协调性,表明青藏高原东南缘物质逃逸不仅受走滑控制,而且受底面拆离的制约,为走滑-拆离构造耦合机制。

提出 $35\sim 15\text{ Ma}$ 期间腾冲地体物质受走滑和拆离构造制约而向北和北东方向运动,形成片麻岩穹隆构造;而印度支那地体相对向南东的运动的逃逸机制(图23)。以此来解释印度/亚洲碰撞在青藏高原东南缘发生的物质逃逸的重大事件。

这些新的研究结果将为检验不同的大陆变形模式以及判断大型走滑剪切带在大陆逃逸过程中是否起唯一作用的挑战。

2.8 青藏高原的片麻岩穹隆(群)

片麻岩穹隆是在折返造山过程中形成的穹隆状构造,它的成因机制探索已经成为重塑各类造山过程的重要构造元素。片麻岩穹隆是以核部无(或弱)岩浆组构的花岗岩类和混合岩化岩石、边部具有岩浆组构的花岗片麻岩,幔部由来自地壳深部的高级片岩、片麻岩和其他类型变质岩为特征的“构造集合体”或“特殊构造单元”,是岩浆(含混合岩化)、变质和变形共同作用的产物,是不同造山过程中某些阶段的重要标志。我们通过分析全球典型片麻岩穹隆的岩石组合、构造特征、形成机制和大地构造背景,结合对青藏高原及邻区大量的片麻岩穹隆(群)特征的研究和归纳,初步确定了以下的片麻岩穹隆群:北喜马拉雅“拉轨岗日片麻岩穹隆群”、松潘—甘孜“雅江片麻岩穹隆群”、“帕米尔片麻岩穹隆群”和“冈底斯东南片麻岩穹隆群”等。

2.8.1 松潘—甘孜造山带“雅江片麻岩穹隆群”

雅江片麻岩穹隆群位于松潘—甘孜印支造山带中NW-SE向鲜水河左行走滑断裂的西南侧的雅江—道孚县之间,为印支造山事件之后,晚印支期至燕山期大量地壳重熔造成的“S”型花岗岩侵位,出现以上升的深熔花岗岩体为中心的“热隆”构造^[133]。实际上,岩体边部为三叠纪变质的片岩,属于片(麻)岩穹隆类型。雅江片麻岩穹隆群由长征、瓦多、甲基卡和容须卡等片(麻)岩穹隆组成,穹隆的核部是以花岗岩类岩石为特征,边部发育面理组构的花岗片麻岩,幔部的围岩为区域三叠纪西康群复理石地层,经历绿片岩相区域变质作用。在穹隆形成过程中,发生同构造软化的高温热变质作用,自里向外为夕线石、十字石、红柱石、石榴石、黑云母和绢云母-绿泥石变质带。根据热温度计计算结果,估计夕线石+十字石-红柱石+石榴石+黑云母矿物组合形成温度为 $T=650\sim 550\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P=(4\sim 5)\times 10^5$

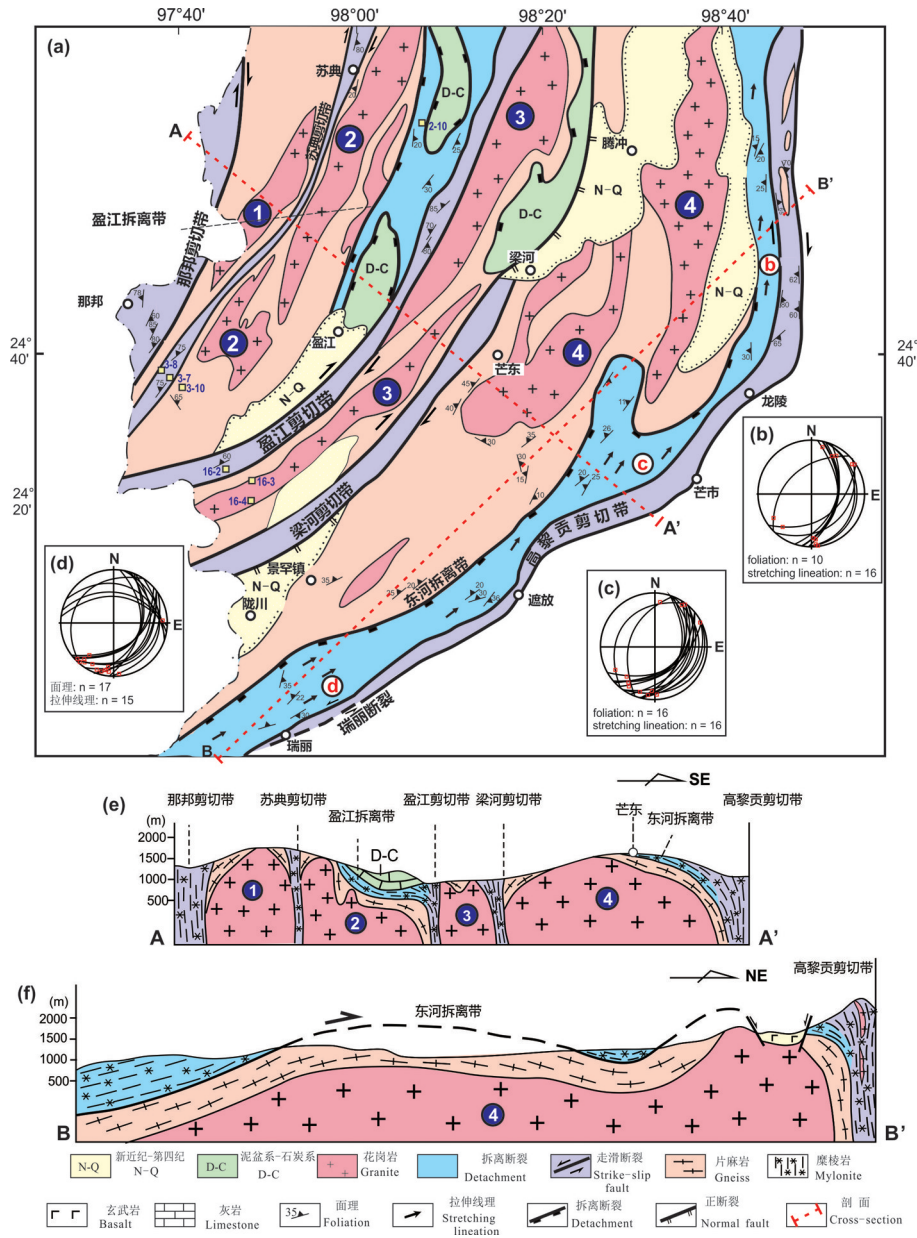


图 22 青藏高原三江地区腾冲地体的构造图(a)及剖面图(e,f)(据 Xu^[28])

a 据云南省地质局 1: 250,000 滇西地区地质图(2008)修正; b, cd 为东河拆离剪切带中的面理和拉伸线理投影图。YJSZ—盈江走滑剪切带; LHSZ—梁河走滑剪切带; GLGSZ—高黎贡走滑剪切带; SDSZ—苏典走滑剪切带; NBSZ—拉邦走滑剪切带。①—苏典(Sudian)花岗岩体; ②—盈江(Yingjiang)花岗岩体; ③—古永(Guyong)花岗岩体; ④—东河(Donghe)花岗岩体。

构造图显示来自前人和笔者的 U-Pb 年龄。东河拆离剪切带的面理和线理下半球投影: b—北龙陵地区; c—西芒市地区; d—北瑞丽地区; e—NW 向剖面 AA'; f—NE 向剖面 BB'; ①—苏典片麻岩穹隆; ②—盈江片麻岩穹隆; ③—贵永片麻岩穹隆; ④—东河片麻岩穹隆

Fig. 22 Simplified geological map (a) and geological section (e, f) of the Tengchong Terrane in western Yunnan Province with geochronological data

a Simplified geological map modified after the 1: 250,000 Geological Map of Luxi Region by Geological Survey of Yunnan Province (2008); b, c, d Lower hemisphere projection of the foliation and stretching lineation of the Donghe Detachment; YJSZ—Yingjiang strike-slip shear zone; LHSZ—Lianghe strike-slip shear zone; GLGSZ—Gaoligong strike-slip shear zone; SDSZ—Sudian strike-slip shear zone; NBSZ—Naban strike-slip shear zone; ①—Sudian granite pluton; ②—Yingjiang granite pluton; ③—Guyong granite pluton; ④—Donghe granite pluton. Sample locations are labeled by the first two numbers in a sample number.

U-Pb zircon ages from previous studies and this study. Lower hemisphere projection of the foliation and stretching lineation of the Donghe Detachment from: b—the northern Longling area, (c—the western Mangshi area, and d—the northern Ruili area, e—NW-trending cross-section AA' and f—NE-trending cross-section BB' in the southern Tengchong Terrane.

①—Sudian gneiss dome; ②—Yingjiang gneiss dome; ③—Guyong gneiss dome; ④—Donghe gneiss dome



图23 腾冲地体的弯曲模式(据 Xu^[28])

五角星表示东构造结在41 Ma的位置,腾冲地体围绕原东构造结沿着右行走滑断裂顺时针旋转,这些走滑断裂将腾冲地体分割成若干的平行板片,并围绕原始东构造结形成垂直倾伏的褶皱,形成腾冲地体的弯曲模式

Fig. 23 A bending model of the Tengchong Terrane (after Xu^[28]) A star indicates the position of the proto-eastern Himalayan syntaxis at 41 Ma. Clockwise rotation of the Tengchong Terrane around proto-eastern Himalayan syntaxis was achieved by the dextral movement along strike-slip shear zones, which separated the Tengchong Terrane into several parallel crustal slices and formed vertically plunging folds around the proto-eastern Himalayan syntaxis

Pa. 黑云母+白云母+绢云母+绿泥石组合,形成压力 $P=(3-4) \times 10^5$ Pa 和温度 $T=450-500^\circ\text{C}$ ^[133](图24)(图25),雅江片麻岩穹隆中核部花岗岩的形成时代大约为200 Ma(据付小芳口述),是典型的印支碰撞折返造山的产物。富含锂辉石矿的稀土资源的雅江热隆构造的提出,对于稀土资源前景的预测有着重要的理论指导意义。

2.8.2 帕米尔片麻岩穹隆群

帕米尔山脉是由北帕米尔、中帕米尔和南帕米尔次级山脉组成^[134-140](图26)。研究表明,在帕米尔山脉中存在大量的片麻岩穹隆,譬如,在北帕米尔的Kurgovat和Kongur-Mustagata片麻岩穹隆、在中帕米尔的Yazgulom、Sarez、Muskol和Shatput

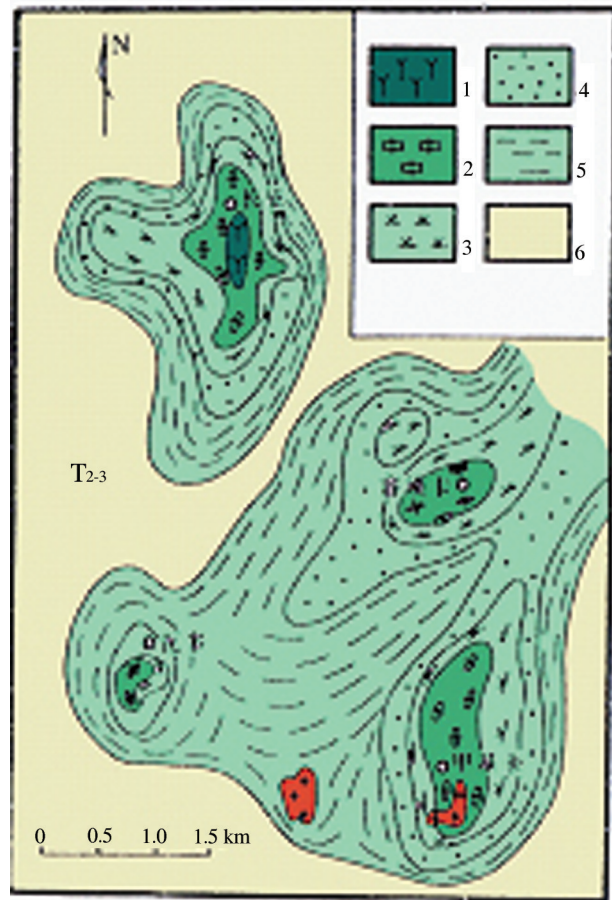


图24 松潘—甘孜造山带西南部雅江地区三叠纪西康群中的片麻岩穹隆分布图(据许志琴^[133])

1—夕线石带; 2—十字石带; 3—红柱石带 4—石榴石带; 5—黑云母带; 6—绢云母-绿泥石带

Fig. 24 The distribution of the gneiss domes of the Xikang Group in the Yajiang region (after Xu^[133])

1-Sillimalite zone; 2-Granatite zone; 3-Andalusite zone; 4-Garnet zone; 5-Biotite zone; 6-Sericite-Chlorite zone

片麻岩穹隆,以及在南帕米尔的Shakhdara片麻岩穹隆^[141](图26),均包含与同时代的花岗岩与花岗片麻岩共存的巴罗式变质泥岩相的多期高级变质岩,它们形成在压力为6.5~14.6 kbar,温度700~800 °C的环境^[141]。这表明,中—南帕米尔山的变质岩是从30~40 km深度折返上来的。Robinson^[142]认为,渐新世—中中新世时期,由于塔里木地块沿主帕米尔逆冲断裂向南俯冲,造成中—下地壳加厚和向上挤出,形成中—南帕米尔片麻岩穹隆群。

但是,北东帕米尔的空喀山(Kongur)片麻岩穹隆是由核部花岗岩、边部具有岩浆组构的花岗片麻岩

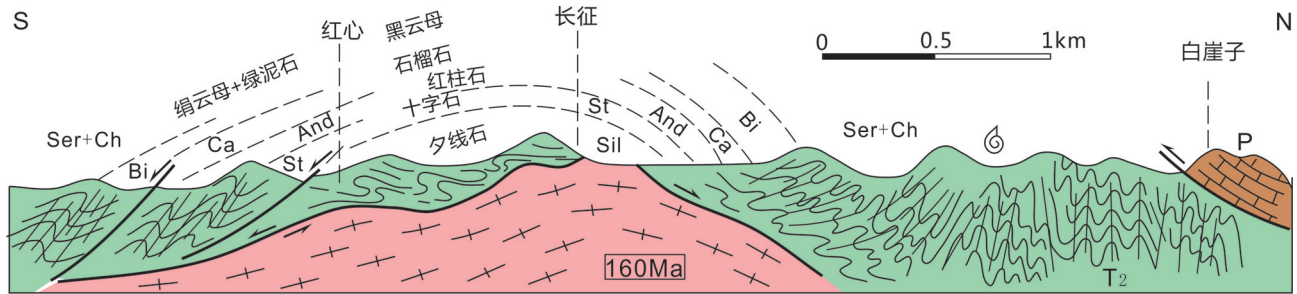


图 25 雅江地区长征片麻岩穹隆的构造剖面图 (据许志琴^[133])

Fig. 25 The cross-section of the Changzheng gneiss dome in the Yajiang region (after Xu^[133])

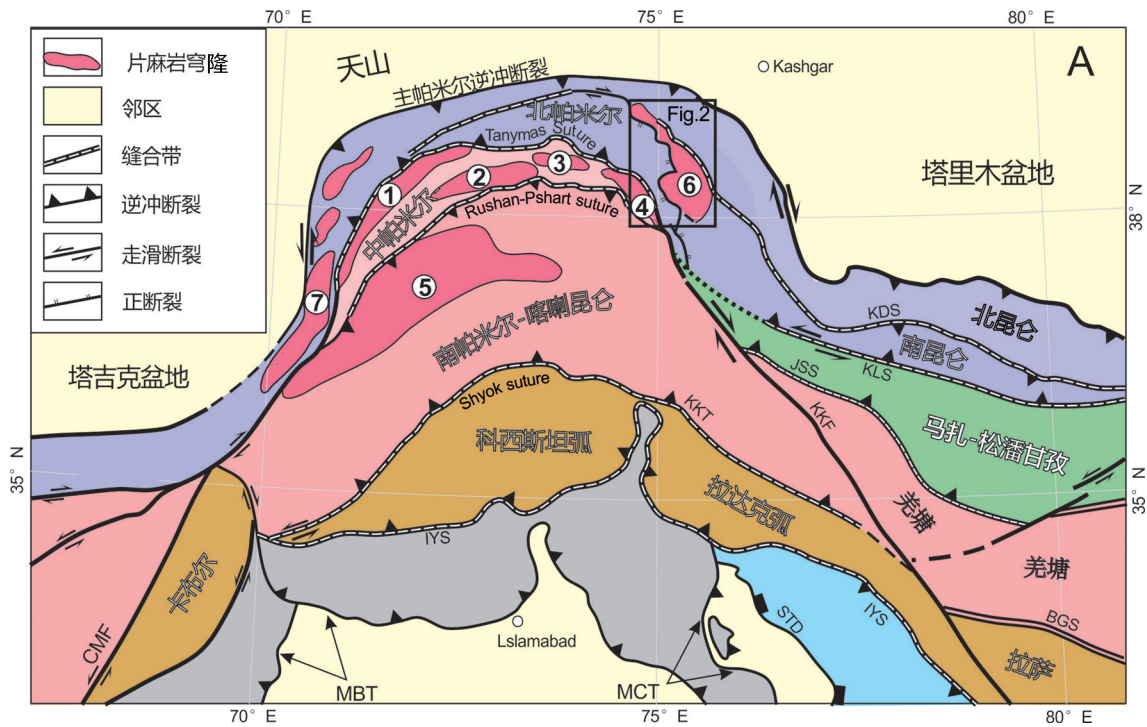


图 26 帕米尔片麻岩穹隆群分布图(据文献[139-143])

位于中帕米尔的穹隆: ①Yazgulom 穹隆, ②Sarez 穹隆, ③Muskol 穹隆, ④Shortpat 穹隆; 位于南帕米尔的穹隆: ⑤Sarez 穹隆; 位于北帕米尔的穹隆: ⑥空喀山(Kongur)穹隆 ⑦Kurgovat 穹隆

MPT—主帕米尔逆冲断裂; KDS—库地缝合带; KLS—昆仑缝合带; JSS—金沙江缝合带; IYS—印度—雅鲁藏布江缝合带; BGS—班公湖—怒江缝合带; KKF—喀喇昆仑断裂; MKT—主喀喇昆仑逆冲断裂; CMT—恰曼断裂; STD—藏南拆离系; MCT—主中冲断裂; MBT—主边冲断裂

Fig. 26 Tectonic map of the western end of the Himalayan—Tibetan orogen showing distribution of gneiss domes (modified after references [139-143])

MPT—Main Pamir Thrust; KDS—Kudi suture zone; KLS—Kunlun suture zone; JSS—Jingshajiang suture zone; IYS—Indus—Yaluzangbujian suture zone; BGS—Bangonghu—Nujiang suture zone; KKF—Karakurun Fault; MKT—Main Karakurun Thrust; CMT—Chaman Fault; STD—South Tibet Detachment; MCT—Main Central Thrust; MBT—Main Bounded Thrust

和幔部的高级变质岩(麻粒岩相和高角闪岩相)组成。变质岩经历了 Barrovian 变质作用(4.7~7.4 kbar, 686~730°C), 麻粒岩相(10~12 kbar, 760~820°C) 和退变质岩相 ($P = 2.6\sim 5.1$ kbar, $T = 555\sim 631^\circ\text{C}$) 的变质作用。年代学测定空喀山岩体和变质作用发生在

224~210 Ma, 其原岩主要源于中下地壳的再造, 是深层次岩基作用。研究表明空喀山片麻岩穹隆形成在与西昆仑古特提斯洋盆板片向北俯冲有关的中下地壳缩短和加厚的环境下。继晚中生代经历了缓慢隆升后, 在晚新生代东西向伸展作用形成的

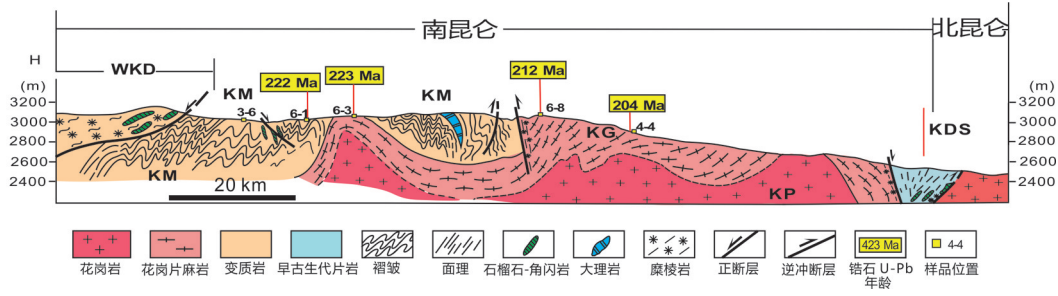


图 27 空喀山片麻岩穹隆剖面图

KP—空喀山花岗岩体; KG—空喀山花岗片麻岩; KM—空喀山变质岩; KDS—库地始特提斯缝合带; EKT—东空喀山逆冲断裂; WKD—西空喀山拆离断裂

Fig. 27 Cross-section of the Kongur gneiss dome (after 1: 250,000 Geological Map of West Kunlun) KP—Konggur granite; KG—Konggur granitic gneiss; KM—Konggur metamorphic rocks; KDS—Kudi Proto-Tethys suture zone; EKT—East Konggur Thrust; WKD—West Konggur Detachment

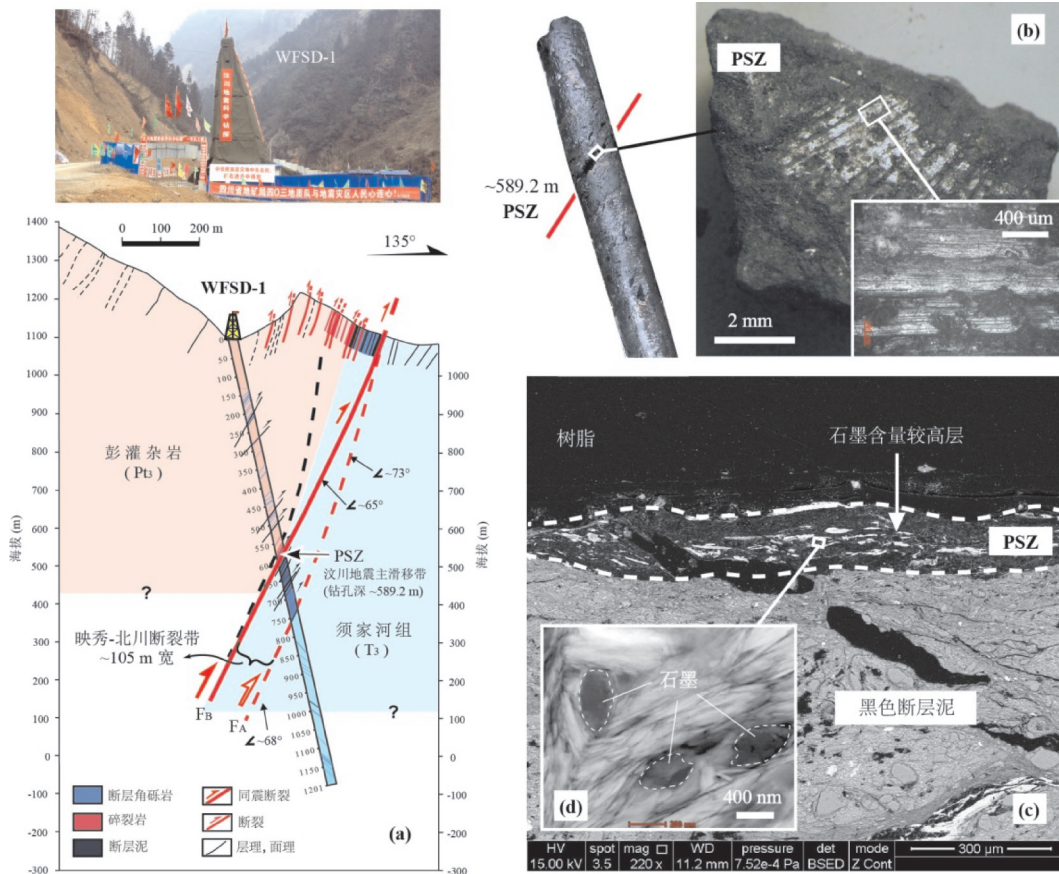


图 28 汶川地震断裂科学钻探 (WFSD-1) 岩心剖面以及地震主滑移带特征(据 Li^[145])

a—WFSD-1 剖面图, 汶川地震同震破裂带中的主滑移带 (红线, 在岩心 589.2 m 深处) 斜切映秀—北川断裂带; b—岩心 589.2 m 深处发育汶川地震擦痕的断层泥表面, 反光度较高; c—主滑移带局部扫描电镜背散射图像, 显示其厚度约为 200 μm, 局部富含石墨; d—透射电镜图像显示纳米级石墨颗粒

Fig. 28 Petrological profile of the Scientific Drilling on the Wenchuan Earthquake Fault (WFSD-1) and characteristics of seismic principal slip zone (modified after Li^[145])

a—Sketch profile of the WFSD-1, the Wenchuan earthquake PSZ cuts across the Yingxiu—Beichuan fault obliquely; b—Drilling core from 589.2 m—depth shows slickensides with high reflection; c—SEM—BSE image shows that Wenchuan earthquake PSZ is about 200 μm—thick and is locally rich in graphite; d TEM image shows nanometer graphite particles

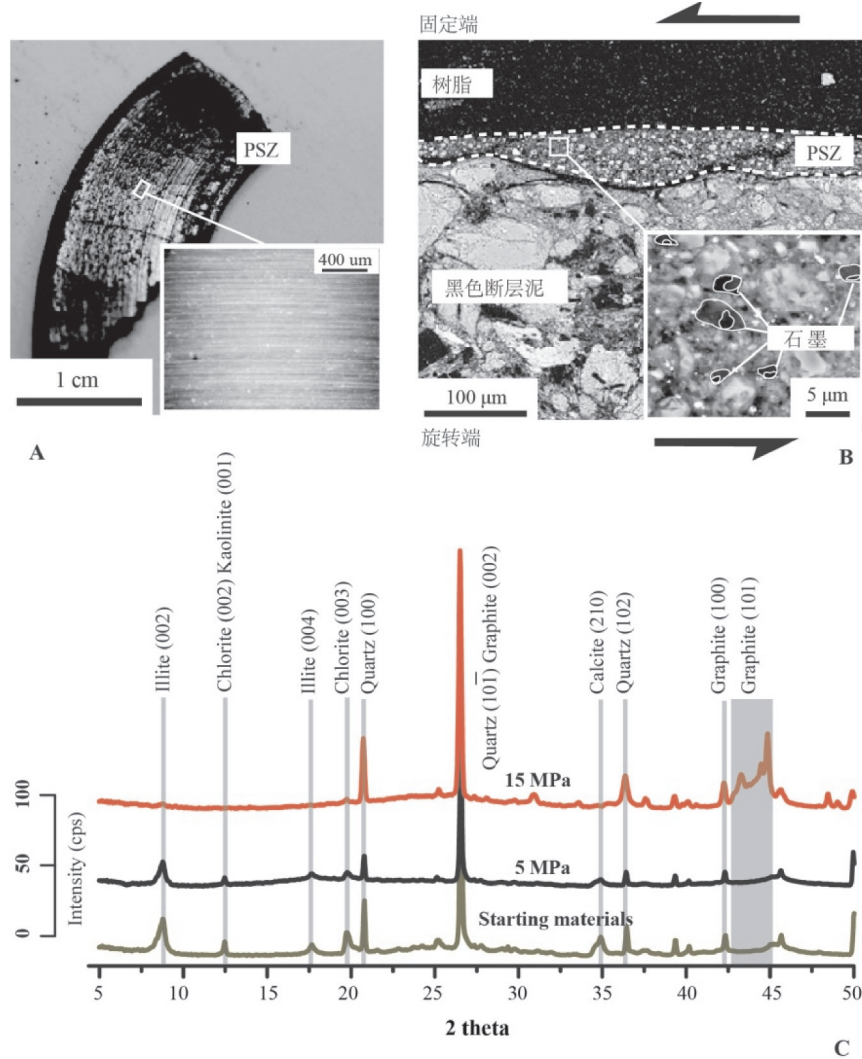


图 29 摩擦实验中变形断层泥的显微构造特征和断裂主滑移带(PSZ)的矿物特征(据 Kuo^[146])

A—汶川地震断裂主滑移带高反光度表面发育擦痕,其方向与旋转运动方向相同;B—SEM-BSE 图片中细化主滑移带(PSZ)厚度 25~125 μm,右下插图显示细小石墨颗粒;C—原位同步辐射 XRD 谱图显示主滑移带矿物变化

Fig. 29 Microstructural characteristics of experimentally deformed black gouges and mineral characteristics of the principal slip zone (PSZ) (after Kuo^[146])

A—Photograph of highly reflective surface of the principal slip zone (PSZ) lined by slickenlines and grooves that track the rotary motion of the gouge holder; B—SEM-BSE images show fine-grained PSZ of 25–125 μm thick. Inset backscattered SEM image shows detail of small graphite particles; C—Mineralogical changes within the experimental PSZ determined by in situ synchrotron X-ray analyses

西空喀山拆离断层系和变质核杂岩构造,空喀山片麻岩穹隆遭遇快速隆升,出露地表(待发表)(图 27)。因此,空喀山片麻岩穹隆经历了古特提斯洋盆岩石圈板片向北俯冲产生的中下地壳岩浆弧根增生,和中新世以来印度/亚洲碰撞引起空喀山片麻岩穹隆快速上隆的变质核杂岩机制制约,是典型的“俯冲+碰撞”复合型片麻岩穹隆。

2.8.3 冈底斯东南花岗片麻岩穹隆

拉萨地体东南部林芝地区,位于新特提斯洋盆

俯冲上盘。东冈底斯岩浆带由大量 120~20 Ma 的花岗岩基组成,在林芝地区,核部花岗岩、边部花岗片麻岩以及周围幔部的中-高级变质岩石组成若干次片麻岩穹隆(即片麻岩穹隆群)(图 13)。研究表明,林芝地区幔部变质岩主要经历了多期变质作用:早期的麻粒岩相事件(90 Ma),中期麻粒岩相变质作用和部分熔融事件(67~52 Ma),晚期的角闪岩相事件(36~33 Ma)^[143,144],可以确定前两期发生在中一下地壳的岩浆和变质作用与新特提斯雅鲁藏布

大洋岩石圈板片的俯冲有关,后期变质事件是印度/亚洲碰撞折返的结果。片麻岩穹隆核部90 Ma的紫苏花岗岩、65~56 Ma的I型花岗岩和30 Ma的花岗岩构成复式岩体,表明由局部熔融造成的地壳流上升导致的花岗岩浆事件在俯冲和碰撞两个阶段有多期发生(图14)。

冈底斯东南花岗片麻岩穹隆代表来自下地壳同时发生的岩浆、变质和变形作用的记录,其最初的形成与雅鲁藏布江新特提斯大洋岩石圈板片向北俯冲到拉萨地体之下有关,并叠加了新特提斯洋关闭后陆-陆碰撞阶段的多期岩浆事件。林芝片麻岩穹隆的出露,表明该地区经历了大幅度的抬升,与新特提斯洋俯冲有关的弧岩浆的根部已经裸露。查明整个冈底斯地体中与俯冲增生和碰撞有关的片麻岩穹隆的形成背景,有利于认识冈底斯岩浆弧的形成和演化过程,并揭示不同类型、不同期次岩浆带与多金属矿集区的形成、分布、出露和保存情况的联系。

2.9 青藏高原东缘汶川强震机制

“汶川地震断裂科学钻探(WFSD)工程”是在2008年5月12日汶川8级大地震发生后,实施的一项国家级专项项目,是世界上最快回应大地震的科学钻探。目前已完成5口钻孔总共7800 m深的钻井工程,研究工作正在进行之中,现将初步成果汇集如下:

2.9.1 确定汶川地震断裂带的构造背景

汶川大地震造成沿龙门山的映秀—北川断裂发生270 km的破裂带,通过映秀—北川断裂带地表露头 and 汶川科钻岩心研究,发现映秀—北川断裂带由5个具不同特征的断裂岩带组成,并具有多核结构特征。不同断裂岩组合及其结构特征显示,每次地震断裂的活动具有向下盘迁移的趋势,而且,研究表明映秀—北川断裂带是一条具有长期演化历史的地震断裂带。

研究确定了映秀—北川断裂带是一条长期闭锁、易产生大地震的高角度逆冲断裂带;而汶川地震沿该断裂发生破裂,是由于汶川地震时映秀—北川断裂破裂迫使其被动滑动。通过对两个科学钻孔岩心的编录和测试以及钻孔地球物理测井发现,在垂直剖面上至少存在三套新元古代彭灌杂岩体逆冲推覆在三叠纪须家河沉积岩之上,表明龙门山构造带由一系列逆冲岩片叠置而成,成为典型的双

冲构造(Thrust-duplex)。不仅改变了长期以来国外著名科学家提出的认为龙门山主体物质彭灌杂岩是无根构造,是通过下地壳隧道流的形式,由地壳深部垂直抬升上来的基底物质所构成的认识,我们重新建立了龙门山构造格架,为认识龙门山的形成和汶川地震背景奠定了基础。

2.9.2 汶川地震强震机制

地震机制是研究地震发生机理的关键,目前尚未解决。我们通过汶川科钻所获得的特有的宝贵资料,初步揭开特大地震发生的地震机制“谜团”。

1) 发现石墨——判断大地震新的地震化石

断裂弱化机制是认识地震破裂过程的重要内容。在汶川科钻一号孔岩心中,发现汶川地震形成了1~2 mm厚的主滑移带,在主滑移带内发现石墨出现,表明热增压作用是重要的断裂弱化机制,表明汶川地震断裂强度极低。摩擦实验显示在正应力约为15 MPa时,表现为明显动力弱化且断层泥中出现石墨(图28~图29)。因此,提出石墨沿滑移带的富集不仅可以作为上地壳地震滑移期间瞬时摩擦生热的标志,而且可以作为大地震发生的标志。这一结果对认识汶川地震破裂过程具有关键意义。

2) 发现和确定了目前世界上最低的活动断层摩擦系数

为什么2008年5.12汶川大地震在90秒时间内形成200多千米长的断层滑动破裂带?围绕此问题,我们进行断层的摩擦系数——这一涉及断裂强度和同震弱化的关键力学性质参数的研究。汶川地震断裂科学钻探WFSD-1钻孔完钻后,对钻井内温度进行了长达5年的监测。长期温度剖面显示,汶川地震主滑移面的温度异常在监测期间从震后一年的0.15 °C降至0.02 °C,之后该异常随时间的推移未见明显变化。汶川地震过程中摩擦导致的热量远小于29 MJ/m², 0.02 °C的最大值,意味着在589 m深处有效的动摩擦系数小于0.02(图30),这是目前为止自然界断层中获得的最低摩擦系数,远低于前人在高速摩擦实验中观察到的最低值0.1。这一结果不仅解释了汶川大地震大型断层滑动破裂带的形成,也直接回答了一直困扰在地震地质和地震物理学领域几十年的关键问题

3) 第一次记录到汶川大震后断裂带快速愈合信息,揭示出可能的地震周期

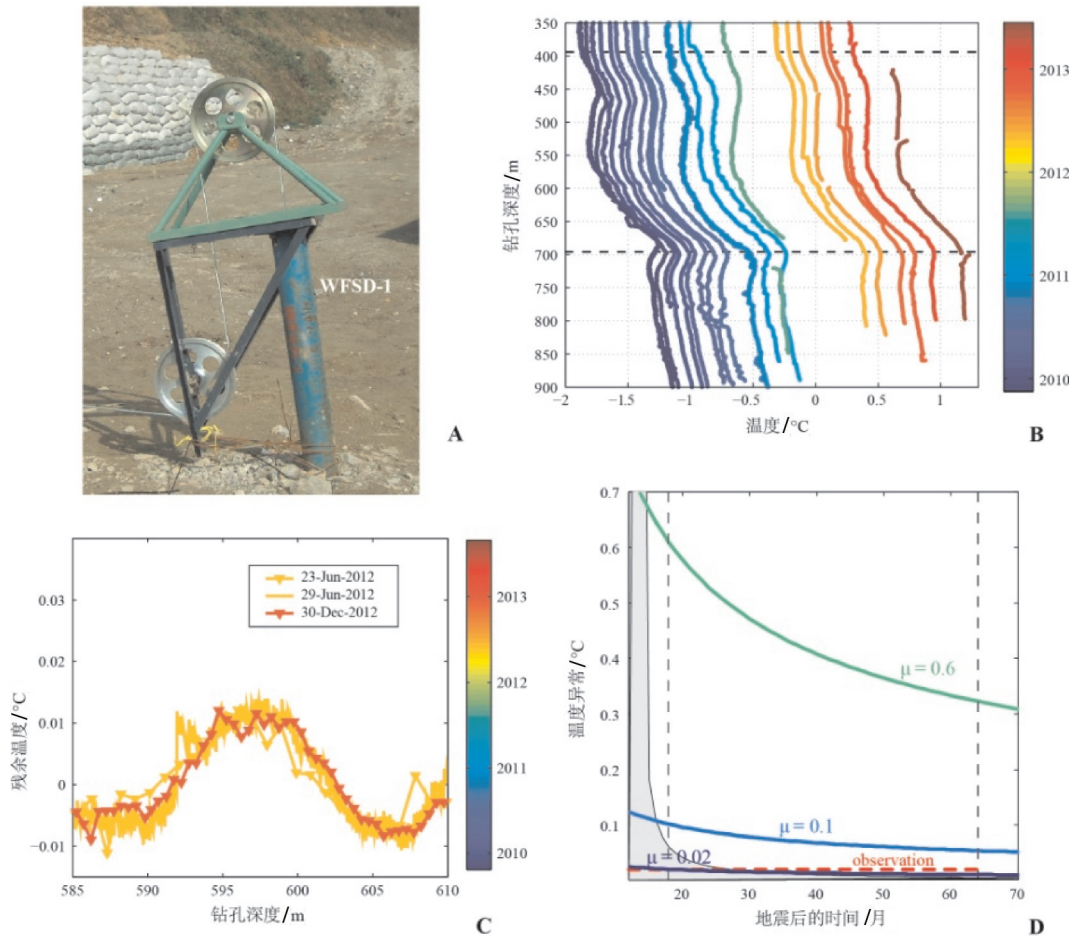


图30 汶川地震断裂科学钻探WFS-1钻孔内长期温度测温数据(据Li^[145])

A-汶川地震断裂科学钻探WFS-1钻孔及长期测温设备; B-21条长期测温剖面(已扣除地温梯度0.02℃/m); C-0.02℃的残余热; D-WFS-1钻孔中跨断层温度异常的最大振幅估算的断裂有效同震摩擦系数($\mu=0.02$)

Fig. 30 Long-time temperature measurement in the Scientific Drilling on the Wenchuan Earthquake Fault (WFS-1) (modified after Li^[145])

A-WFS-1 drill hole and long-term temperature measurement device; B-Complete data set focused on 350-800 m-depth; C-Close-up of the 589 m zone from the high-precision stop-go logs with arbitrary zeros; (d)-Predicted maximum amplitude of the temperature anomaly for the fault in the WFS-1 drill hole with representative effective coseismic coefficients of friction

断裂带中渗透率变化可以反映其裂隙的发育和愈合情况,也是地震断层强化重新获取能量的指示。断裂的震后愈合对认识孕震机制和地震周期具有重要意义。我们在汶川地震断裂科学钻探WFS-1钻孔中进行了长期的水文测量,发现汶川地震断裂带(映秀—北川断裂带)的渗透率整体随时间的变化而快速减小(图31),这种行为可以解释为震后断裂闭合或者连通性降低,反映了映秀—北川断裂带的震后快速愈合过程,对于当地的孕震机制以及地震周期有指示意义。这是世界上第一次用水文方法连续观测到一条断层破裂带震后愈合的过程。

2.10 青藏高原碰撞造山成矿模式

作为形成超大陆的最重要和最有效的机制,陆-陆碰撞形成的碰撞造山带常绵延数千千米,成为地球表面最为最重要的地质构造单元^[18]。然而,伴随着大陆碰撞而发生的成矿作用一直没有引起矿床界的足够重视。为查明大陆碰撞造山过程中的成矿作用及其发育机制,建立与完善大陆碰撞成矿理论体系,侯增谦等^[148-150]针对印度/亚洲主碰撞带斑岩铜矿的岩浆起源和演化、岩浆富水机制和富金属集矿机制等问题研究,建立了青藏高原斑岩型铜矿成矿理论模型;开展青藏高原东部冕宁—德昌REE矿带的岩

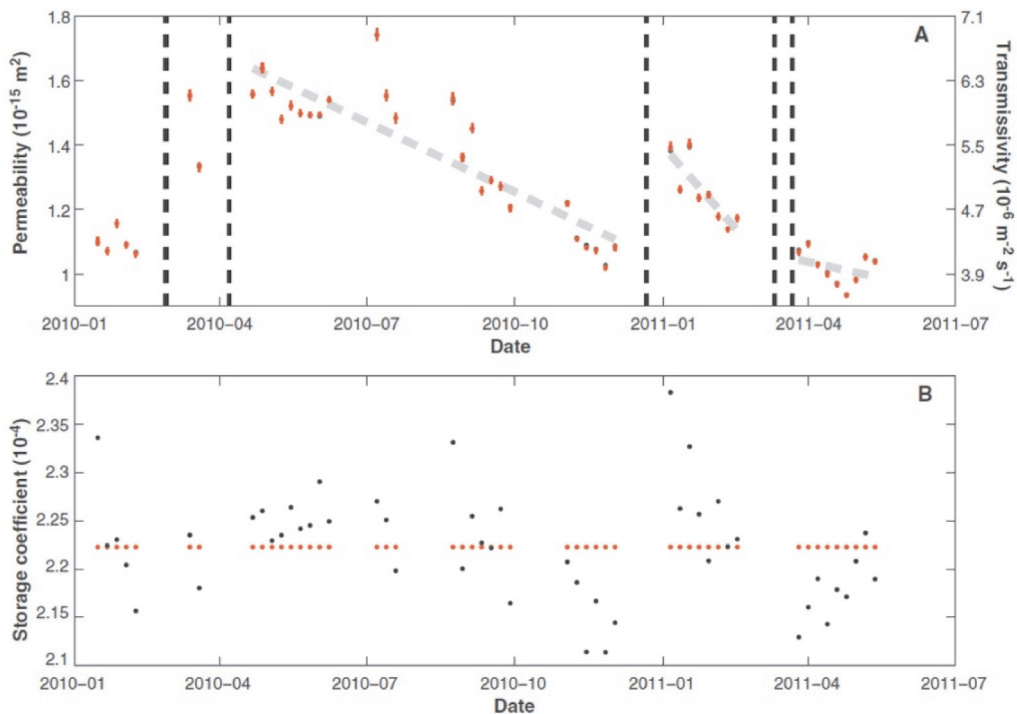


图31 汶川地震断裂科学钻探WFSD-1水文地质参数随时间变化图(据Xue^[147])

A-渗透率和导水系数; B-储水系数; 黑色的小圆点代表没有约束的换算值, 红色的点代表将S值固定在平均值后换算的结果, 图A中黑色点完全覆盖了红点; 垂向虚线代表选区的地震事件, 造成渗透率的快速上升

Fig. 31 Hydrogeologic properties of the well-aquifer system over time from the Scientific Drilling on the Wenchuan Earthquake Fault (WFSD-1) (After Xue^[147])

A-Permeability and transmissivity; B-Storage coefficient. The black dots denote an unconstrained inversion; the red dots are the results of inversion with the storage coefficient fixed to a single value. Because the two separate inversions have identical results for transmissivity, the red dots cover the black dots in A. The vertical dashed lines show the time of the selected teleseismic events, which correspond to sudden increases in permeability

石学、地球化学和成矿学研究, 揭示岩浆碳酸岩型REE矿床成矿机理; 以拉萨地体中生代岩浆岩为探针, 揭示了青藏高原岩石圈三维架构和物质组成, 探索了不同类型的地壳对成矿系统的控制。

2.10.1 查明了冈底斯含矿斑岩的时空分布规律

位于青藏高原南缘的冈底斯斑岩铜矿带, 其成因与中新世的埃达克质斑岩体密切相关。这些斑岩体在拉萨地体南缘呈狭长(1500 km)的带状分布, 年龄介于26~10 Ma^[81,148,149], 其空间分布与南拉萨新生地壳相对应^[150]。含铜岩浆及斑岩铜矿主要集中于冈底斯中段, 斑岩结晶年龄介于20~12 Ma, 侵位高峰期在(16±1) Ma; 成矿年龄介于13.5~20.7 Ma, 集中于(15±1) Ma^[148]。提出青藏高原中新世斑岩铜矿形成于后碰撞地壳伸展环境。

2.10.2 提出含矿与贫矿斑岩的岩浆起源机制

如何有效地评价斑岩体的成矿潜力, 一直是斑岩

矿床勘探的难点。侯增谦等^[149]通过冈底斯带含矿斑岩与贫矿斑岩的地球化学对比研究发现, 两者存在显著的岩石地球化学差异: 提出含矿岩浆主要源自有大量幔源物质贡献的新生下地壳部分熔融, 而贫矿岩浆则更多地受古老下地壳物质成分的控制。

2.10.3 提出了含铜岩浆的金属富集机制

岛弧及陆缘弧环境的斑岩铜矿, 其成矿所需要的金属与硫, 最终来自俯冲的大洋板片和/或楔形地幔; 而碰撞造山环境下, 由于板片俯冲事件的缺失, 此种环境下斑岩铜矿的成矿金属来源不清^[50]。本次研究发现, 俯冲阶段底侵于下地壳的幔源物质及其携带的金属硫化物, 在碰撞造山过程中因软流圈上涌引发部分熔融, 部分熔融过程中早阶段沉淀的硫化物发生重熔和活化, 向埃达克岩浆系统中注入了大量的金属Cu、Au和S151^[150]。作为包体出现的幔源镁铁质岩浆可能也向斑岩岩浆系统提供了部分

Cu、Au 和 S。因此,含矿岩浆的($\epsilon_{\text{Hf}}(t)+\epsilon_{\text{Nd}}(t)$)值与矿床 Cu 的储量呈现正相关关系。斑岩($\epsilon_{\text{Hf}}(t)+\epsilon_{\text{Nd}}(t)$)值可能是快速评价碰撞带斑岩型 Cu 矿床成矿潜力的有效地球化学指标^[149]。

2.10.4 建立了碰撞型斑岩铜矿成矿新模型,揭示了俯冲型与碰撞型斑岩铜矿的成因联系

侏罗纪俯冲型斑岩铜矿与中新世碰撞型斑岩铜矿,时间上相差 150 Ma^[150]。发现俯冲型弧岩浆大规模底侵形成新生下地壳,为碰撞型含矿岩浆提供了理想源区。在岩浆底侵过程中,弧岩浆在相对封闭环境下保持高氧逸度,导致金属 Cu、Au 逐渐集聚于进化岩浆中,形成俯冲型斑岩铜矿。相反,弧岩浆在开放环境与地壳反应,岩浆氧逸度降低,导致岩浆硫化物在新生下地壳堆积。在后期碰撞过程中,富含金属硫化物的新生下地壳因软流圈上涌或基性岩浆注入而发生部分熔融,金属 Cu 向岩浆系统释放,形成碰撞型斑岩铜矿(图 32)^[150]。由图可见软流圈上涌引发加厚下地壳熔融,形成含铜岩浆^[150]。

2.10.5 大陆碰撞成矿系统的深部岩石圈三维架构控制研究取得创新成果

采用锆石 Hf 同位素资料,揭示了拉萨冈底斯地体岩石圈三维架构。以中生代岩浆岩(花岗岩类和长英质火山岩)为探针,运用 Hf 同位素填图技术,利用本团队和前人获得的 230 套全岩 4762 套锆石 Hf 同位素数据,成像了拉萨地体的三维岩石圈架构,提供了西藏第一幅反映地壳结构和时空演化的

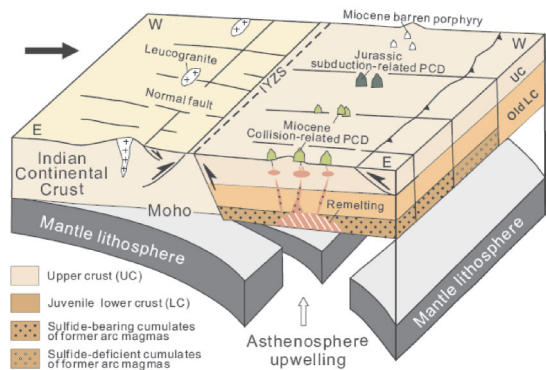


图 32 冈底斯碰撞型斑岩铜矿床成矿模型

Fig. 32 The metallogenic model of the collisional related porphyry deposits from the Gandise belt

Hf 同位素图(图 33)^[151]。

通过 Hf 同位素填图(图 34),识别出拉萨地体由 3 个块体构成:(1)南拉萨新生地壳块,(2)北拉萨新生地壳块和(3)中拉萨古老再造地壳块。研究提出,中拉萨古老再造地壳块反映拉萨地体是一个长期活动的不断被改造的太古宙—元古宙古老微大陆,裂离自南部冈瓦纳大陆。南北拉萨新生地壳块是特提斯洋向拉萨地体之下俯冲消减和弧岩浆底侵—注入和岩浆弧不断向拉萨地体拼贴的结果。

青藏高原主要成矿系统及其矿带分布与岩石圈三维架构存在明显的空间对应关系(图 35)。冈底斯斑岩铜矿带严格地限于南拉萨新生地壳块内,班公湖—怒江带斑岩铜矿限于拉萨地体北部的新生地壳块内,证明含矿岩浆起源于新生下地壳。青藏高原主要大型铅锌矿集中分布于中拉萨地体古老地壳域内或边缘,反映古老地壳的熔融产生了含矿花岗岩岩浆,并提供了成矿物质。青藏高原大型铁矿或铁铜矿通常分布于古老地壳块的同位素边缘,介于新生地壳与古老地壳接触带,暗示岩石圈不连续控制了壳幔岩浆混合和铁铜富集。

通过对比研究发现,冈底斯大量的斑岩铜矿产生于大陆碰撞过程,形成了一条世界级规模的特提斯铜矿带^[148,152]。识别出三种不同的深部过程,为成

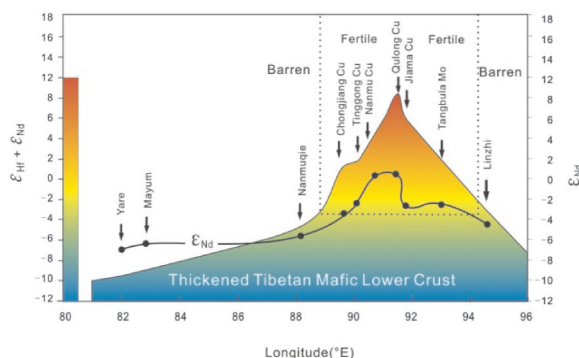


图 33 拉萨冈底斯地体中新世花岗岩 Nd 和 Hf 同位素初始值在不同经度上的分布特征,由图可见含矿岩体具有高 Nd 和 Hf 同位素初始值(据 Hou^[151])

Fig. 33 The eNd and eHf isotopic characteristics in difference longitudes of the Miocene granite from the Gandise belt, Lhasa terrane. The ore bearing granites have high eNd and eHf isotopic data, which are shown in the figure (modified after Hou^[151])

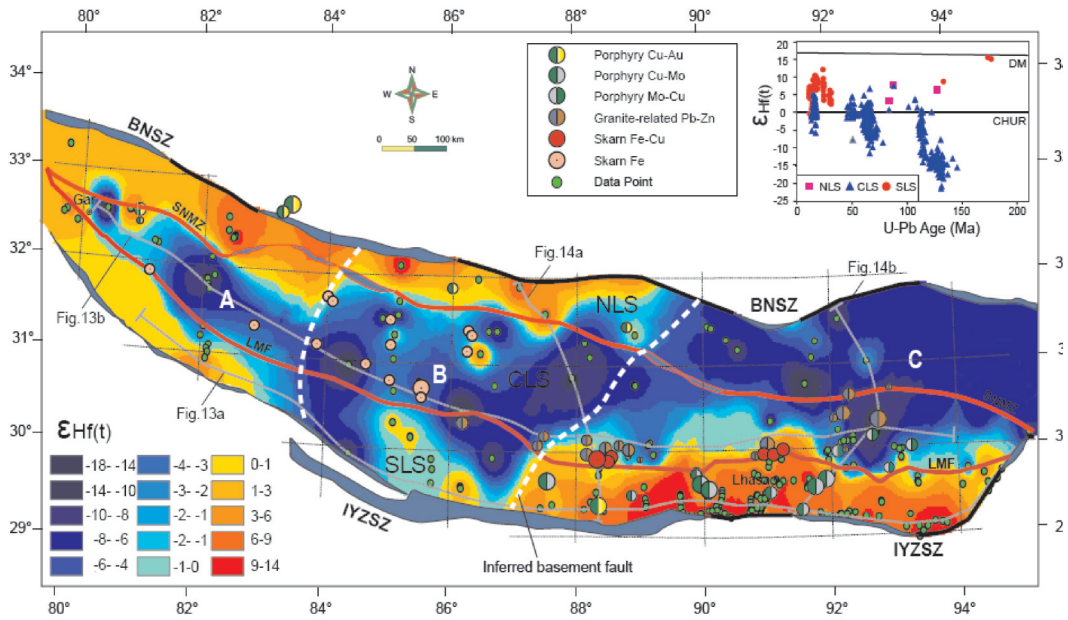


图34 拉萨地体中新代岩浆岩Hf同位素特征及矿床分布 (据 Hou^[151])
 BNSZ—班公湖—怒江缝合带; IYZSZ—雅鲁藏布江缝合带; NLS—北拉萨;
 CLS—中拉萨; SLS—南拉萨; Inferred basement fault—推测基底断裂

Fig.34 the $\epsilon_{Hf}(t)$ isotopic data of the Mesozoic and Cenozoic magmatic rocks and related deposit distribution in the Lhasa terrane (modified after Hou^[151])

BNSZ—Bangong Co–Nujiang River Suture Zone; IYZSZ—Indus Yarlung Zangbo Suture Zone;
 NLS—North Lhasa; CLS—Central Lhasa; SLS—South Lhasa

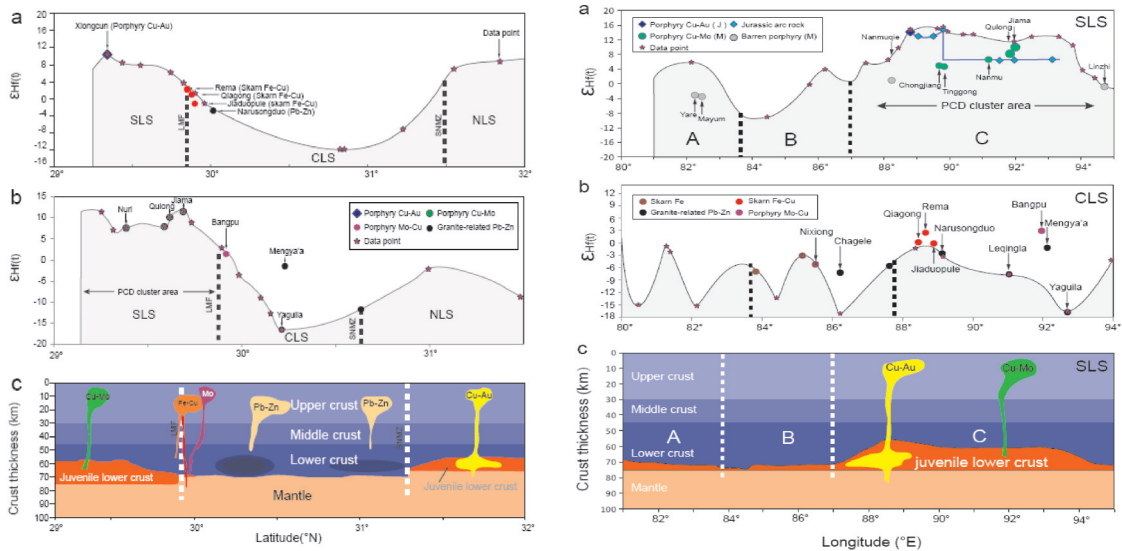


图35 青藏高原主要成矿系统与岩石圈三维架构的对应关系 (据 Hou^[151])

Fig. 35 The relationship between the main metallogenic system and three-dimensional structure of the lithosphere in the Tibetan Plateau (modified after Hou^[151])

矿系统形成提供了物质和能量,发现碰撞过程应力场幕式张压交替转换,为成矿流体系统提供了动力驱动机制。提出拉萨地体由中央的前中生代古老

地块和两侧的新生地壳构成,斑岩铜矿严格地限制在新生地壳分布区。提出碰撞型斑岩铜矿三维成矿新模型。

2.11 印度-亚洲碰撞的数值模拟

印度/亚洲大陆碰撞动力学是研究青藏高原的核心内容,在广泛的地质和地球物理观测的基础上,数值模拟越来越成为研究该动力学过程的重要手段。李忠海博士的陆-陆碰撞到洋-陆俯冲数值模拟,对印度/亚洲碰撞——从挤压到侧向逃逸的构造转换进行了动力学的诠释^[153-156]。

2.11.1 高角度和低角度大陆板块俯冲模式对比

在正常的高角度俯冲模型中(图36-a),大陆边缘物质沿着高角度的大洋俯冲带俯冲于>100 km以下,伴随着俯冲带入口处中上地壳的拆离以及一系列逆冲断层的形成。随着俯冲作用的继续进行,积累在俯冲带中的部分熔融物质向上挤出至地壳深度,然后超高压岩石在浮力的作用下折返至地表,并形成穹隆结构。这些超高压岩石主要在缝合带附近展布,同时在前陆地区形成300~400 km的褶皱逆冲断裂带。温压轨迹显示了折返至地表岩石的峰值压力温度条件分别为2.5~4 GPa和600~

800°C,这意味着这些超高压岩石形成于>100 km的深度而后折返于地表。

而在大陆板块平俯冲模型中(图36-b),大陆边缘开始沿着低角度的大洋俯冲带进行俯冲,达到峰值压力条件。而后,俯冲板块主体与上覆大陆板块开始碰撞,伴随着一系列逆冲断裂带的产生。部分熔融首先发生在上覆板块末端的穹隆下部,持续的大陆物质进入俯冲带,最终导致这些部分熔融岩石的侵入。最后,高压高温(HP-HT)变质岩石折返至地表,并于缝合带附近形成一个穹隆结构。同时,在前陆部分形成一个300~400 km的褶皱逆冲断裂带。温压轨迹显示,折返至地表的岩石的峰值压力和温度条件分别为<2.5 GPa和600~800°C。这意味着这些岩石形成于<80 km的深度范围内,属于高压变质岩的范畴。

2.11.2 数值模型对于印藏俯冲碰撞过程的启示

在喜马拉雅中部地区,大部分的地球物理剖面显示,印度板块近水平的俯冲于亚洲板块之下,形

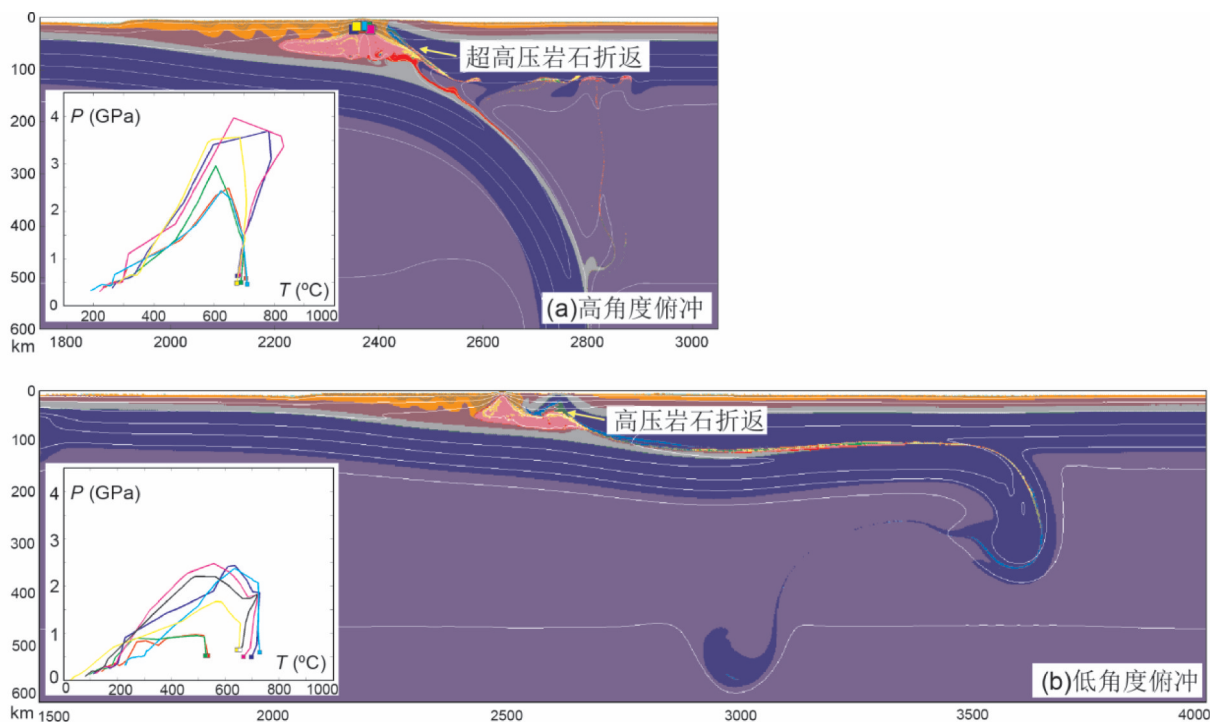


图36 大陆板块俯冲角度对高压-超高压变质岩石形成和折返的控制作用

a—高角度大陆板块深俯冲伴随着超高压变质岩石的形成和折返;

b—低角度大陆板块平俯冲模型中超高压岩石无法折返,只有高压岩石折返至地表

Fig. 36 Constraints of continental subduction angle on the formation and exhumation of HP-UHP metamorphic rocks
a—the formation and exhumation of UHP rocks in the steep continental subduction channel; b—the flat continental subduction model, only HP rocks can exhume to the surface; while UHP rocks are absent

成低角度俯冲模式^[157,158,7]。在喜马拉雅中部腹地这片广大的地区,出露了多处高压变质块体,然而以柯石英为代表的超高压变质岩至今尚未发现。在我们的平角度俯冲模型中,俯冲下去的大陆地壳岩石只有从<80 km的深度折返至地表,从而只能形成高压变质带,这一点也是与喜马拉雅中部地区的特征相吻合的。同时,平俯冲数值模型和喜马拉雅中部的地球物理剖面还有其他的一些共同特征,例如,俯冲板块的‘翻转’结构,拆沉的俯冲岩石圈残余,以及前陆地区的系列逆冲断裂带^[104]。总而言之,平俯冲模型与喜马拉雅中部的结构是比较吻合的,包括:(1)地球物理剖面所指示的深部结构,(2)超高压变质岩石的缺失,以及(3)俯冲带前陆地区的地壳结构等。

在喜马拉雅西部地区,大部分的地球物理剖面显示,印度板块高角度俯冲于Hindu Kush之下^[159,160]。超高压岩石出露于西喜马拉雅构造结附近的Kaghan和Tso Morary地区,源岩是印度板块的大陆边缘物质。对于Kaghan块体,其含柯石英岩石的峰值变质条件为(3.0±0.2) GPa和770±50°C,以及无柯石英的岩石变质条件为(2.4±0.2) GPa和610±30°C。对于Tso Morary地块,Mukheerjee^[161]测定其峰值温压条件为>3.5 GPa和>750°C。这些数据都显示了印度大陆物质俯冲至>100 km的深度,而后折返到地表。高角度俯冲的数值模型显示了超高压变质岩石的形成和折返,模型结果与西喜马拉雅构造结有着紧密的一致性,例如(1)超高压变质岩石主要分布在缝合带附近,呈穹隆状,(2)岩石类型主要为大陆边缘的中上地壳,以及(3)峰值变质条件为2.5~4 GPa和600~800°C。

通过上述观测数据与数值模拟结果对比,我们提出了喜马拉雅造山带的“空间差异性俯冲碰撞模式”^[153]。该模式主要是基于前文喜马拉雅的观测数据和数值模型的对比研究,西喜马拉雅地区主要是高角度俯冲占主导,而中东部地区以低角度俯冲占主导。

2.11.3 洋-陆空间转换俯冲-碰撞数值模型

在自然界中所有的会聚大陆板块都有侧向边界,并与周围的大洋板块或其他大陆板块相邻。因此,造山带的边缘与造山带内部一般拥有不同的浅层地质特征和深部结构,例如喜马拉雅造山带的东

西构造结和造山带中部具有非常大的差异性^[154]。对于这种典型的三维问题,我们设计了一系列沿走向的差异性俯冲碰撞三维数值模型(图37)。该模型中,伴随着大陆的俯冲(10~15 Ma),模型的会聚速率从初始的5 cm/a降低至2.5 cm/a。模型演化的基本结果是:(1)在大洋俯冲一侧,海沟持续的后撤,伴随着俯冲大洋板块的脱水,以及地幔楔中的水化和部分熔融作用;同时,大洋海沟的后撤产生了弧后的伸展以及边缘海盆地的拉张。(2)在大陆碰撞一侧发生了不同的故事,大陆俯冲碰撞后,与之相连的大洋岩石圈发生断裂,推动了俯冲大陆地壳的折返,并且造山带的地形起伏可达5~6 km。(3)上覆地壳物质从大陆碰撞一侧向大洋俯冲一侧运移。模型结果显示强烈的沿走向的变形以及物质的侧向挤出,这与喜马拉雅造山带东缘的挤出构造具有相似的构造背景和动力学特征,从而揭示其机制^[154]。

3 讨论

青藏高原生长和印度-亚洲的汇聚-碰撞过程的大陆动力学探索是地学界极为关注的命题,对于固体地球科学理论的发展具有全球意义。青藏高原中赋存众多世界级和国家级矿产资源,是实现我国找矿重大突破的攻坚地域;布满高原的大型成矿带(冈底斯、三江、特提斯-喜马拉雅等)是改变我国金属矿产资源布局的雄厚战略储备基地;也是严重短缺的铬铁矿资源重大突破的希望所在。作为主体在中国大陆的青藏高原,研究青藏高原的动力学、发掘资源前景是中国地学家肩负的科学和社会使命。

青藏高原大陆动力学的进一步研究,将以东特提斯演化和青藏高原生长为主线,以贯穿东特提斯和青藏高原5个地体(祁连-阿尔金-昆仑、羌塘、冈底斯、喜马拉雅及三江)及边界(始特提斯缝合带/古特提斯缝合带/新特提斯缝合带)的科技长廊地质调查,以及对主要含油气盆地(羌塘)、主要大型俯冲-碰撞型岩浆成矿带(冈底斯地体和班公湖-怒江缝合带)的构造-沉积-岩浆-成矿综合调查为基础,通过多学科精细研究和高技术的测试,全面开展东特提斯不同时期(始、古、新特提斯)构造演化研究,重建特提斯-青藏高原“多地体、多洋盆、多俯冲、多碰撞造山”的构造格局,并探究其与特提斯各阶段成矿系列

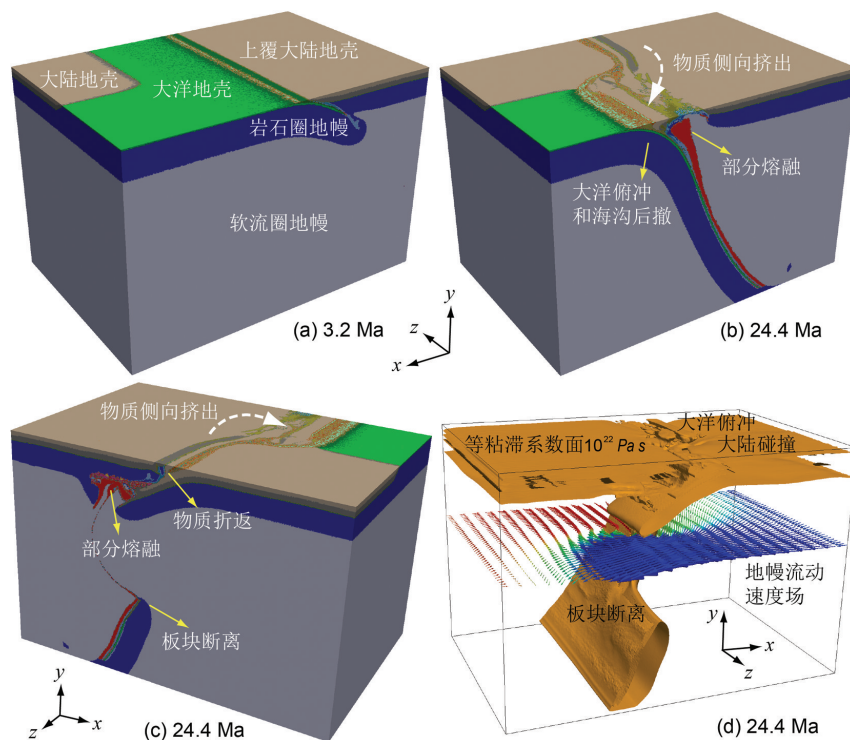


图37 大洋俯冲和大陆碰撞沿走向转换的三维数值模型 (据Li^[154])

a-b—大洋俯冲一侧的演化特征;c—大陆碰撞一侧的演化特征;d—等效粘滞系数面揭示洋-陆转换会聚深部结构的差异性及地幔流动
Fig. 7 Three-dimensional numerical model of the along-strike transition between oceanic subduction and continental collision (after Li^[154])

a-b—Model evolution viewed from the oceanic subduction side; c—Model evolution viewed from the continental collision side; d— Iso-viscosity surface reveals the contrasting deep structures between the oceanic subduction and continental collision, as well as the characteristics of deep mantle flow

关系,为特提斯-青藏高原主要成矿带的找矿突破战略前景提供科学的背景资料。

在综合廊带资料的基础上,查明青藏高原成矿区带及关键构造区带深部构造演化与成矿条件,对于认识青藏高原的地壳结构以及主要成矿带和含油气盆地的深部背景有重要意义。大陆动力学的深入研究需要大幅度提升青藏高原地质调查水平,形成东特提斯演化、青藏高原生长及其能源-资源响应的国际领先的特提斯-青藏高原理论。

致谢:张森和许翠萍为本文绘制部分图件和校对文献,特此感谢。感谢地学界同仁的关心、支持和帮助。

参考文献(References):

- [1] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 造山的高原——青藏高原的地体拼合、碰撞造山及隆升机制[M]. 北京: 地质出版社, 2007:1-458.
Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibing, et al. Orogenic Plateau – terrane Amalgamation, Collisional Orogeny and Uplifting of the

Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007:1-458(in Chinese with English abstract).

- [2] Tapponnier P G, Peltzer, Armijo R. On the mechanics of the collision between India and Asia[C]// Coward M P, Riess A C. Collision Tectonics. Geo. Soc. Spec. Publ. London, 1986, 19: 115-157.
[3] Molnar P. A review of geophysical constraints on the deep structure of the Tibetan Plateau, the Himalaya and the Karakoram, and their tectonic implications[J]. Phil. Trans. R. Soc. Lond, 1988, A326: 33-88.
[4] 许志琴, 李海兵, 唐哲民, 等. 大型走滑断裂对青藏高原地体构架的改造[J]. 岩石学报, 2011, 27(11):3157-3170.
Xu Zhiqin, Li Haibing, Tang Zhemin, et al. The transformation of the terrain structures of the Tibet Plateau through large-scale strike-slip faults[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(11): 3157-3170(in Chinese with English abstract).
[5] Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision[J]. Science, 1975, 189: 419-426.
[6] Yin A. Cenozoic tectonic evolution of Asia: A preliminary synthesis. Tectonophysics[J]. 2010, 488: 293-325.
[7] Nabelek J, Hetenyi G, Vergne J, et al. Underplating in the

- Himalaya–Tibet Collision Zone Revealed by the Hi–CLIMB Experiment[J]. *Science*, 2009, 325: 1371–1374.
- [8] Avouac J P, Tapponnier P. Kinematic model of active deformation in central Asia[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1993,20: 895–898.
- [9] Sengör A M C, Natal' in B A. Paleotectonic of Asia: Fragments of a synthesis[C]//Yin A, Harrison M (eds.). *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 486–640.
- [10] Gehrels G E, Yin A, Wang X F. Detrital–zircon geochronology of the northeastern Tibetan plateau[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2003,115(7): 881–896.
- [11] Xiao W J, Windley B F, Yong Y, et al. Early Paleozoic to Devonian multiple–accretionary model for the Qilian Shan, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 35(3/4): 323–333.
- [12] Pan G T, Wang L Q, Li R S, et al. Tectonic evolution of the Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 53: 3–14.
- [13] Sengör A M C. The Palaeo–Tethyan suture: A line of demarcation between two fundamentally different architectural styles in the structure of Asia[J]. *Island Arc*, 1992, 1(1): 78–91.
- [14] Sengör A M C, Natal' in B A, Burtman U S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 1993, 364(6435): 299–307.
- [15] Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, et al. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic belt[J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164(10): 31–47.
- [16] Sengör A M C. East Asian tectonic collage[J]. *Nature*, 1987, 318 (6041): 16–17.
- [17] Dewey J F, Shackleton R M, Chang C F, et al. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1988, 327(1594): 379–413.
- [18] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan–Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, 28: 211–280.
- [19] Wan Y S, Zhang J X, Yang J S, et al. Geochemistry of high–grade metamorphic rocks of the North Qaidam mountains and their geological significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 28(2/3): 174–184.
- [20] Tung K A, Yang H J, Yang H Y, et al. SHRIMP U–Pb geochronology of the zircons from the Precambrian basement of the Qilian Block and its geological significances[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(11): 2687–2701.
- [21] Tung K A, Yang H Y, Liu D Y, et al. The Neoproterozoic granitoids from the Qilian block, NW China: Evidence for a link between the Qilian and South China blocks[J]. *Precambrian Research*, 2013, 235: 163–189.
- [22] Yu S Y, Zhang J X, Li H K, et al. Geochemistry, zircon U–Pb geochronology and Lu–Hf isotopic composition of eclogites and their host gneisses in the Dulan area, North Qaidam UHP terrane: New evidence for deep continental subduction[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(3): 901–919.
- [23] Wang C, Liu L, Yang W Q, et al. Provenance and ages of the Altyn Complex in Altyn Tagh: Implications for the early Neoproterozoic evolution of northwestern China[J]. *Precambrian Research*, 2013, 230: 193–208.
- [24] Gehrels G E, Kapp P, DeCelles P, et al. Detrital zircon geochronology of pre–Tertiary strata in the Tibetan–Himalayan orogen[J]. *Tectonics*, 2011,30(5): TC5016.
- [25] Metcalfe I. Gondwana dispersion and Asian accretion: tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 66: 133.
- [26] Yan Z, Aitchison J, Fu C L, et al. Hualong Complex, South Qilian terrane: U–Pb and Lu–Hf constraints on Neoproterozoic micro–continental fragments accreted to the northern Proto–Tethyan margin[J]. *Precambrian Research*, 2015, 266: 65–85.
- [27] Ueno K, Wang Y, Wang X. Fusulinoidean faunal succession of a Paleo–Tethyan oceanic seamount in the Changning–Menglian Belt, West Yunnan, Southwest China: An overview[J]. *The Island Arc*, 2003, 12: 145–161.
- [28] Xu Z Q, Wang Q, Cai Z H, et al. Kinematics of the Tengchong Terrane in SE Tibet from the late Eocene to early Miocene: Insights from coeval mid–crustal detachments and strike–slip shear zones [J]. *Tectonophysics*, 2015,665: 127–148.
- [29] Cawood P A, Kröner A. Earth Accretionary Systems in Space and Time[M]. Geological Society of London Special Publication, 2009, 318: 1–36.
- [30] Cawood P A, Kröner A, Collins, et al. Accretionary orogens through Earth history[M]. Geological Society of London, 2009.
- [31] Miyashiro A. The Troodos ophiolitic complex was probably formed in an island arc[J]. *Earth Planet Science Letters*, 1973, 19: 218–224.
- [32] Ernst W G. Alpine and Pacific styles of Phanerozoic mountain building: Subduction–zone petrogenesis of continental crust[J]. *Terra Nova*, 2005, 17:165–188.
- [33] Brown M. Duality of thermal regimes is the distinctive characteristic of plate tectonics since the Neoproterozoic[J]. *Geology*, 2006, 34: 961–964.
- [34] Brown M. Metamorphic patterns in orogenic systems and the geological record[C]//Cawood P A, Kröner A (eds.). *Earth Accretionary Systems in Space and Time*. Geological Society, London Special Publications, 2009,318 : 37–74.
- [35] Carter A, Roques D, Bristow C, et al. Understanding Mesozoic accretion in Southeast Asia: significance of Triassic thermotectonism (Indosinian orogeny) in Vietnam[J]. *Geology*, 2001, 29:211–214.
- [36] Metcalfe I. Permian tectonic framework and palaeogeography of

- SE Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 20: 551–566.
- [37] Metcalfe I. Tectonic framework and Phanerozoic evolution of Sundaland[J]. *Gondwana Research*, 2011, 19: 3–21.
- [38] Metcalfe I. Palaeozoic and Mesozoic tectonic evolution and palaeogeography of East Asian crustal fragments: the Korean Peninsula in context[J]. *Gondwana Research*, 2006, 9: 24–46.
- [39] Metcalfe I. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 66: 1–33.
- [40] Lepvrier C, Maluski H. L'orogénèse Trisique Indosinienne en Asie de l'Est[J]. *Editorial Comptes Rendus Geoscience*, 2008, 340: 75–82.
- [41] Feng Q, Liu B. A new Early Devonian radiolarian genus from western Yunnan[J]. *Science in China (Series B)*, 1993, 36: 242–248.
- [42] Feng Q L, Ye M. Permian radiolarian sedimentary assemblage and paleoecology in south and southwest China[C]//Long Xiangfu (ed.). *Devonian to Triassic Tethys in Western Yunnan, China*. China University of Geosciences Press, Wuhan, 1996, 106–112.
- [43] Feng Q, Zhang Z. Early Carboniferous radiolarians from West Yunnan[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 1997, 14: 79–92.
- [44] Sone M, Metcalfe I. Parallel Tethyan sutures in mainland Southeast Asia: new insights for Palaeo–Tethys closure and implications for the Indosinian orogeny[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2008, 340: 166–179.
- [45] Kapp P, Yin A, Craig E, et al. Blueschist-bearing metamorphic core complexes in the Qiangtang block reveal deep crustal structure of northern Tibet[J]. *Geology*, 2000, 28: 19–22.
- [46] Pullen A, Kapp P, Gehrels G E, et al. Metamorphic rocks in central Tibet: Lateral variation and implications for crustal structure[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2011, 123: 585–600.
- [47] Zhai Q G, Zhang, R Y, Jahn, B M, et al. Triassic eclogites from central Qiangtang, northern Tibet, China: Petrology, geochronology and metamorphic $P-T$ path[J]. *Lithos*, 2011, 125: 173–189.
- [48] Yang J S, Xu Z Q, Li Z L, et al. Discovery of an eclogite belt in the Lhasa block, Tibet: A new border for Paleo–Tethys? [J]. *Journal of Asian Earth Sciences* 2009, 34: 76–89.
- [49] Yang J S, Robinson P T, Dilek Y. Diamonds in ophiolites[J]. *Elements*, 2014, 10: 127–130.
- [50] Yang J S, Meng F C, Xu X Z, et al. Diamonds, native elements and metal alloys from chromites of the Ray–Iz ophiolite of the Polar Urals[J]. *Gondwana Research*, 2015, 27: 459–485.
- [51] Xu X Z, Yang J S, Robinson P T, et al. Origin of ultrahigh pressure and highly reduced minerals in podiform chromitites and associated mantle peridotites of the Luobusa ophiolite, Tibet[J]. *Gondwana Research*, 2015, 27: 686–700.
- [52] Yang J S, Dobrzhinetskaya L, Bai W J, et al. Diamond-bearing coesite-bearing chromitites from the Luobusa ophiolite, Tibet[J]. *Geology*, 2007, 35(10): 875–878.
- [53] Dobrzhinetskaya L F, Yang J S, Green H W, et al. Qingsongite, natural cubic boron nitride: The first boron mineral from the Earth's mantle[J]. *American Mineralogist*, 2014, 99: 764–772.
- [54] Yamamoto S, Komiya T, Hirose K, et al. Coesite and clinopyroxene exsolution lamellae in chromites: In-situ ultrahigh-pressure evidence from podiform chromitites in the Luobusa ophiolite, southern Tibet[J]. *Lithos*, 2009, 109 (3): 314–322.
- [55] Liou J G, Tsujimori T, Yang J, et al. Recycling of crustal materials through study of ultrahigh-pressure minerals in collisional orogens, ophiolites, and mantle xenoliths: A review[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 96: 386–420.
- [56] Coleman R G. The ophiolite concept evolves[J]. *Element*, 2014, 10(2): 82–84.
- [57] Howell D, Griffin W L, Yang J, et al. Diamonds in ophiolites: Contamination or a new diamond growth environment? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 430: 284–295.
- [58] Zhang Z M, Zhao G C, Santosh M, et al. Two-stages of granulite-facies metamorphism in the eastern Himalayan syntaxis, south Tibet: Petrology, zircon geochronology and implications for the subduction of Neo–Tethys and the Indian continent beneath Asia[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2010, 28: 719–733.
- [59] Dong X, Zhang Z M, Santosh M. Zircon U–Pb Chronology of the Nyingtri Group, Southern Lhasa Terrane, Tibetan Plateau: implications for Grenvillian and Pan–African Provenance and Mesozoic–Cenozoic Metamorphism[J]. *Journal of Geology*, 2010, 118: 677–690.
- [60] Zhang Z M, Zhao G C, Santosh M, et al. Late Cretaceous charnockite with adakitic affinities from the Gangdese batholith, southeastern Tibet: evidence for Neo–Tethyan mid-ocean ridge subduction? [J]. *Gondwana Research*, 2010, 17: 615–631.
- [61] Sisson V B, Hollister L S, Onstott T C. Petrologic and age constraints on the origin of a low-pressure/high-temperature metamorphic complex, southern Alaska[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94: 4392–4410.
- [62] Cole R B, Stewart B W. Continental margin volcanism at sites of spreading ridge subduction: examples from southern Alaska and western California[J]. *Tectonophysics*, 2009, 464: 118–136.
- [63] Santosh M, Kusky T, Wang L. Supercontinent cycles, extreme metamorphic processes and changing fluid regimes[J]. *International Geology Review*, 2011, 53: 1403–1423.
- [64] Santosh M, Maruyama S, Sato K. Anatomy of a Cambrian suture in Gondwana: Pacific type orogeny in southern India? [J]. *Gondwana Research*, 2009, 16: 321–341.

- [65] Chung S L, Chu M F, Zhang Y Q, et al. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism[J]. *Earth-Science Reviews*, 2005, 68: 173-196.
- [66] Mo X X, Dong G C, Zhao Z D, et al. Spatial and temporal distribution and characteristics of granitoids in the Gangdese, Tibet and implication for crustal growth and evolution[J]. *Geological Journal of China University*, 2005, 11: 281-290 (in Chinese with English abstract).
- [67] Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, et al. The Lhasa Terrane: record of a microcontinent and its histories of drift and growth[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011,301: 241-255.
- [68] Wen D R, Chung S L, Song B, et al. Late Cretaceous Gangdese intrusions of adakitic geochemical characteristics, SE Tibet: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Lithos*, 2008,105: 1-11.
- [69] Wen D R, Liu D Y, Chung S L, et al. Zircon SHRIMP U-Pb ages of the Gangdese batholith and implications for Neotethyan subduction in southern Tibet[J]. *Chemical Geology*, 2008, 252: 191-201.
- [70] Bourgois J, Martin H, Lagabrielle Y, et al. Subduction-erosion related to ridge-trench collision: Taitao Peninsula, Chile margin triple junction area[J]. *Geology*, 1996, 24: 723-726.
- [71] Guivel C, Lagabrielle Y, Bourgois J, et al. New geochemical constraints for the origin of ridge subduction-related plutonic and volcanic suites from the Chile Triple Junction (Taitao Peninsula and Site 862, LEG ODP141 on the Taitao Ridge) [J]. *Tectonophysics*, 1999, 311: 83-111.
- [72] Thorkelson D J, Breitsprecher K. Partial melting of slab window margins: genesis of adakitic and non-adakitic magmas[J]. *Lithos*, 2005, 79: 25-41.
- [73] Sakaguchi A. High paleo-geothermal gradient with ridge subduction beneath Cretaceous Shimanto accretionary prism, southwest Japan[J]. *Geology*, 1996,24: 795-798.
- [74] Ujiie K. Off-scraping accretionary process under the subduction of young oceanic crust: the Shimanto belt of Okinawa Island, Ryukyu Arc[J]. *Tectonics*, 1997, 16:305-322.
- [75] Osozawa S, Takeuchi H, Koitabashi T. Formation of the Yakuno ophiolite: accretionary subduction under medium-pressure-type metamorphic conditions[J]. *Tectonophysics*, 2004,393: 197-219.
- [76] Zhang Z M, Shen K, Santosh M, et al. High density carbonic fluids in a slab window: Evidence from the Gangdese charnockite, Lhasa terrane, southern Tibet[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011,42: 515-524.
- [77] Matthews K J, Seton M, Muller R D. A global-scale plate reorganization event at 105-100 Ma[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012,355: 283-298.
- [78] Coulon C, Maluski H, Bollinger C et al. Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet: ^{39}Ar - ^{40}Ar dating, petrological characteristics and geodynamical significance[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1986,79: 281-302.
- [79] Lee H Y, Chung S L, Lo C H, et al. Eocene Neotethyan slab breakoff in southern Tibet inferred from the Linzizong volcanic record[J]. *Tectonophysics*, 2009, 477:20-35.
- [80] Guo L, Zhang H F, Harris N, et al. Paleogene crustal anatexis and metamorphism in Lhasa terrane, eastern Himalayan syntaxis: Evidence from U-Pb zircon ages and Hf isotopic compositions of the Nyingchi Complex[J]. *Gondwana Research*, 2012, 21:100-111.
- [81] Chung S L, Liu DY, Ji J Q, et al. Adakites from continental collision zones: melting of thickened lower crust beneath southern Tibet[J]. *Geology*, 2003, 31:1021-1024.
- [82] Zhang Z M, Dong X, Xiang H, et al. Building of the Deep Gangdese Arc, South Tibet: Paleocene Plutonism and Granulite-Facies Metamorphism[J]. *Journal of Petrology*, 2013, 54: 2547-2580.
- [83] Zhang Z M, Dong X, Xiang H, et al. Metagabbros of the Gangdese arc root, south Tibet: Implications for the growth of continental crust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 143: 268-284.
- [84] Searle M P, Elliott J R, Phillips R J, et al. Crustal-lithospheric structure and continental extrusion of Tibet[J]. *Journal of the Geological Society*, 2011, 168(3): 633-672.
- [85] Edwards M A, Kidd W S F, Li J X, et al. Multi-stage development of the southern Tibet detachment system near Khula Kangri—New data from Gonto La[J]. *Tectonophysics*, 1996, 260: 1-19.
- [86] Edwards M A, Harrison T M. When did the roof collapse? Late Miocene north-south extension in the High Himalaya revealed by Th-Pb monazite dating of the Khula Kangri granite[J]. *Geology*, 1997, 25: 543-546.
- [87] Harrison T M, Grove M, McKeegan K D, et al. Origin and episodic emplacement of the Manaslu Intrusive Complex, Central Himalaya[J]. *J. Petrol*, 1999, 40: 3-19.
- [88] Hodges K V, Parrish R R, Searle M P. Tectonic evolution of the central Annapurna Range, Nepalese Himalayas[J]. *Tectonics*, 1996, 15: 1264-1291.
- [89] Schärer U, Xu R, Allegre C. U-(Th)-Pb systematics and ages of Himalayan leucogranites, south Tibet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1986, 77: 35-48.
- [90] Searle M P, Whitehouse M J. Shisha Pangma leucogranite, South Tibetan Himalaya; field relations, geochemistry, age, origin, and emplacement[J]. *Journal of Geology*, 1997, 105(3):295-317.
- [91] Simpson R L, Parrish R R, Searle M P, et al. Two episodes of monazite crystallization during metamorphism and crustal melting in the Everest region of the Nepalese Himalaya[J]. *Geology*, 2000, 28: 403-406.
- [92] Wang Y C, Bin, X Zhang Y Q, et al. U-Pb SHRIMP zircon ages

- of the GUohuonongba tourmaline two-mica granite in Pulan, southwest Tibet[J]. *Geotectonia et Metallogenia*, 2005, 29: 517–521.
- [93] Wu C K D, Nelson G, Wortman S, et al. Yadong cross structure and South Tibetan Detachment in the east central Himalaya (89–90° E) [J]. *Tectonics*, 1998, 17: 28–45.
- [94] Xu R H. Age and geochemistry of granites and metamorphic rocks in south-central Xizang (Tibet) [M]//*Igneous and Metamorphic Rocks of the Tibetan Plateau*. Chinese Academy of Geological Sciences. Science Press, 1990, 287–302.
- [95] Zeng L S, Gao L E, Xie K J, et al. Mid-Eocene high Sr/Y granites in the Northern Himalayan gneiss domes: melting thickened lower continental crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 303: 251–266.
- [96] Zeng, L S, Chen Z Y, Chen J. Metamorphic solid salt (KCl–NaCl) in quartz–feldspathic polyphase inclusions in the Sulu ultrahigh-pressure eclogite[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(8): 931–937.
- [97] Zeng L S, Gao L E, Tang S H, et al. Eocene magmatism in the Tethyan Himalaya, southern Tibet[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2014, 412: SP412–8.
- [98] Gao L E, Zeng L S. Fluxed melting of metapelite and the formation of Miocene high-CaO two-mica granites in the Malashan gneiss dome, southern Tibet[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 130: 136–155.
- [99] Burchfiel B C, Royden L H. North–south extension within the convergent Himalayan region[J]. *Geology*, 1985, 13: 679–682.
- [100] Grujic D, Casey M, Davidson C, et al. Ductile extrusion of the Higher Himalayan Crystalline in Bhutan: evidence from quartz micro-fabrics[J]. *Tectonophysics*, 1996, 260: 21–43.
- [101] Beaumont C, Jamieson G A, Nguy M H, et al. Himalaya tectonics explained by extrusion of a low-viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation[J]. *Nature*, 2001, 414: 738–742.
- [102] Hodges K V, Hurtado J M, Whipple K X, et al. Southward extrusion of Tibetan crust and its effect on Himalayan tectonics[J]. *Tectonics*, 2001, 20: 799–809.
- [103] Grujic D, Hollister L S, Parrish R R. Himalayan metamorphic sequence as an orogenic channel: insight from Bhutan[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 2002, 198(s 1–2):177–191.
- [104] Yin A, Dubey C S, Kelty T K, et al. Structural evolution of the Arunachal Himalaya and implications for asymmetric development of the Himalayan orogen[J]. *Current Science*, 2006, 90: 195–206.
- [105] Webb A A G, Yin A, Harrison T M, et al. The leading edge of the Greater Himalayan Crystallines revealed in the NW Indian Himalaya: Implications for the evolution of the Himalayan Orogen[J]. *Geology*, 2007, 35: 955–958.
- [106] Webb A A G, Yin A, Harrison T M, et al. Cenozoic tectonic history of the Himachal Himalaya (northwestern India) and its constraints on the formation mechanism of the Himalayan orogen[J]. *Geosphere*, 2011, 7: 1013–1061.
- [107] 许志琴,王勤,曾令森,等. 高喜马拉雅的三维挤出模式[J]. *中国地质*, 2013, 40(3):671–68.
- Xu Zhiqin, Wang Qin, Zeng Lingsen, et al. Three-dimensional extrusion model of the Great Himalaya slice[J]. *Geology in China*, 2013, 40(3):671–68 (in Chinese with English abstract).
- [108] Xu Z Q, Wang Q, Arnaud P, et al. Orogen-parallel ductile extension and extrusion of the Greater Himalaya in the late Oligocene and Miocene[J]. *Tectonics*, 2013, 32(2): 191–215.
- [109] Brun J P, Burg J P, Ming C C, et al. Strain trajectories above the Main Central Thrust (Himalaya) in southern Tibet[J]. *Nature*, 1985, 313: 388–390.
- [110] 许志琴,杨经绥,李化启,等. 中国大陆印支碰撞造山系及其造山机制[J]. *岩石学报*, 2012, 28(6): 1697–1709.
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Huaqi, et al. Indosinian collision-orogenic system of Chinese continent and its orogenic mechanism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(6): 1697–1709 (in Chinese with English abstract).
- [111] Pêcher A. The contact between the Higher Himalaya crystallines and the Tibetan sedimentary series: Miocene large scale dextral shearing[J]. *Tectonics*, 1991, 10: 587–598.
- [112] Coleman M E. Orogen-parallel and orogen-perpendicular extension in the central Nepalese Himalayas[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1996, 108(12):1594–1607.
- [113] Pêcher A, Scaillet B. La structure du haut Himalaya au Garhwal[J]. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 1989, 82(2): 655–668.
- [114] Murphy M A, Yin A, Kapp P, et al. Structural evolution of the Gurla Mandhata detachment system, southwest Tibet: Implications for the eastward extent of the Karakoram fault system[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2002, 114(4): 428–447.
- [115] Wang Y, Li Q, Qu G S. ⁴⁰Ar/³⁹Ar thermochronological constraints on the cooling and exhumation history of the South Tibetan Detachment System, Nyalam area, southern Tibet[C]//Law R D, et al(eds.). *Channel Flow, Ductile Extrusion and Exhumation in Continental Collision Zones*. Geol. Soc., London, Spec. Pub., 2006, 268: 327–354.
- [116] Aikman A B, Harrison T M, Ding L. Evidence for Early (> 44 Ma) Himalayan Crustal Thickening, Tethyan Himalaya, southeastern Tibet[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 2008, 274: 14–23.
- [117] Dipietro J A, Pogue K R. Tectonostratigraphic subdivisions of the Himalaya: A view from the west[J]. *Tectonics*, 2004, 23(5): 271–297.

- [118] Pêcher A, Seeber L, Guillot S, et al. Stress field evolution in the northwest Himalayan syntaxis, northern Pakistan[J]. *Tectonics*, 2008, 27(6):178–196.
- [119] Harris N B W, Caddick M, Kosler J, et al. The pressure–temperature–time path of migmatites from the Sikkim Himalaya[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2004, 22(3):249–264.
- [120] Metcalfe R P, Metcalfe R P. Pressure, temperature and time constraints on metamorphism across the Main Central Thrust zone and High Himalayan Slab in the Garhwal Himalaya[J]. *Geological Society of London Special Publications*, 1993, 74(1): 485–509.
- [121] Stephenson B J, Searle M P, Waters D J, et al. Structure of the Main Central Thrust Zone and Extrusion of the High Himalayan Deep Crustal Wedge, Kishtwar–Zaskar Himalaya[J]. *Journal of the Geological Society*, 2001, 158(4):637–652.
- [122] Zeng L S, Liu J, Gao L E, et al. Early Oligocene crustal anatexis in the Yardoi gneiss dome, southern Tibet and geological implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54, 104–112.
- [123] Peltzer G, Tapponnier P. Formation and evolution of strike–slip faults, rifts, and basins during the India–Asia collision – An experimental approach[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1988, 931(B12):15085–15117.
- [124] Royden L H, Burchfiel B C, Van der Hilst R D. The geological evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Science*, 2008, 321(5892): 1054–1058.
- [125] Zhang P Z, Shen Z, Wang M, et al. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data[J]. *Geology*, 2004, 32(9):809–812.
- [126] Leloup P H, Arnaud N, Lacassin R, et al. New constraints on the structure, thermochronology, and timing of the Ailao Shan–Red River shear zone, SE Asia[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2001, 106(B4):6683–6732.
- [127] Clark M K, Royden L H. Topographic ooze: Building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow[J]. *Geology*, 2000, 28(8): 703.
- [128] Allen C R, Gillespie A R, Han Y, et al. Red River and associated faults, Yunnan Province, China: Quaternary geology, slip rates, and seismic hazard[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1984, 95(6):686–700.
- [129] Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, et al. The Ailao Shan–Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina[J]. *Tectonophysics*, 1995, 251(s 1–4):3–10.
- [130] Chung S L, Lee T Y, Lo C H, et al. Intraplate extension prior to continental extrusion along the Ailao Shan–Red River shear zone[J]. *Geology*, 1997, 25(4):311–314.
- [131] Ratschbacher L, Frisch W, Chen C, et al. Cenozoic deformation, rotation, and stress patterns in eastern Tibet and western Sichuan, China[C]//Yin A, Harrison T M (eds.). *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge University Press, Cambridge, 1996: 227–249.
- [132] Wang E, Wang E. Late Cenozoic Xianshuihe–Xiaojiang, Red River, and Dali fault systems of southwestern Sichuan and central Yunnan, China[M]. *Geological Society of America*, 1998.
- [133] 许志琴, 侯立伟, 王宗秀, 等. 中国松潘–甘孜造山带的造山过程[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
Xu Zhiqin, Hou Liwei, Wang Zhongxiu, et al. *Orogenic Processes of the Songpan Garzi Orogenic Belt, China*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992(in Chinese).
- [134] Tapponnier P, Mattauer M, Proust F, et al. Mesozoic ophiolites, sutures, and Large–scale tectonic movements in Afghanistan[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1981, 52 (2): 355–371.
- [135] Burtman V S, Molnar P. Geological and Geophysical Evidence for Deep Subduction of Continental Crust Beneath the Pamir[J]. *Special Paper of the Geological Society of America*, 1993, 281.
- [136] Treloar P J, Izatt C N, Izatt C N. Tectonics of the Himalayan collision between the Indian Plate and the Afghan Block: a synthesis[J]. *Geological Society of London Special Publications*, 1993, 74(1):69–87.
- [137] Brunel M, Arnaud N, Tapponnier P, et al. Kongur Shan normal fault: Type example of mountain building assisted by extension (Karakoram fault, eastern Pamir)[J]. *Geology*, 1994, 22(8):707–710.
- [138] Strecker M R, Frisch W, Hamburger M W, et al. Quaternary Deformation in the Eastern Pamirs, Tajikistan and Kyrgyzstan[J]. *Tectonics*, 1995, 14(5):1061–1079.
- [139] Rumelhart P E, An Y, Cowgill E, et al. Cenozoic vertical–axis rotation of the Altyn Tagh fault system[J]. *Geology*, 1999, 27(9): 480.
- [140] Schneider D A, Edwards M A, Kidd W S F, et al. Tectonics of Nanga Parbat, western Himalaya: Synkinematic plutonism within the doubly vergent shear zones of a crustal–scale pop–up structure[J]. *Geology*, 1999, 27(11):999–1002.
- [141] Schmidt J, Hacker B R, Ratschbacher L, et al. Cenozoic deep crust in the Pamir[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 312: 411–421.
- [142] Robinson A C, Ducea M, Lapen T J. Detrital zircon and isotopic constraints on the crustal architecture and tectonic evolution of the northeastern Pamir[J]. *Tectonics*, 2012, 31(2):531–535.
- [143] Zhang Z M, Zhao G C, Santosh M, et al. Two stages of granulite facies metamorphism in the eastern Himalayan syntaxis, south Tibet: Petrology, zircon geochronology and implications for the subduction of Neo–Tethys and the Indian continent beneath Asia[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2010, 28(7):719–733.

- [144] Zhang Z, Dong X, Xiang H, et al. Building of the Deep Gangdese Arc, South Tibet: Paleocene Plutonism and Granulite-Facies Metamorphism[J]. *Journal of Petrology*, 2013, 54(12): 2547–2580.
- [145] Li H, Xue L, Brodsky E E, et al. Long-term temperature records following the Mw 7.9 Wenchuan (China) earthquake are consistent with low friction[J]. *Geology*, 2015, 43(2): 163–166.
- [146] Kuo L W, Li H, Smith S A F, et al. Gouge graphitization and dynamic fault weakening during the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake[J]. *Geology*, 2014, 42(1):47–50.
- [147] Xue L, Li H B, Brodsky E E, et al. Continuous Permeability Measurements Record Healing inside the Wenchuan Earthquake Fault Zone[J]. *Science*, 2013, 340: 1555–1559.
- [148] Hou Z, Yang Z, Qu X, et al. The Miocene Gangdese porphyry copper belt generated during post-collisional extension in the Tibetan Orogen[J]. *Ore Geology Reviews*, 2009, 36(s 1–3):25–51.
- [149] Hou Z, Zheng Y, Yang Z, et al. Contribution of mantle components within juvenile lower-crust to collisional zone porphyry Cu systems in Tibet[J]. *Mineralium Deposita*, 2012, 48(2):173–192.
- [150] Hou Z, Yang Z, Lu Y, et al. A genetic linkage between subduction- and collision-related porphyry Cu deposits in continental collision zones[J]. *Geology*, 2015, 43(3): 247–250.
- [151] Hou Z, Liu Y, Tian S, et al. Formation of carbonatite-related giant rare-earth-element deposits by the recycling of marine sediments[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5.
- [152] Hou Z, Zhang H, Pan X, et al. Porphyry Cu (–Mo–Au) deposits related to melting of thickened mafic lower crust: examples from the eastern Tethyan metallogenic domain[J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 39(1):21–45.
- [153] Li Z H, Xu Z Q, Gerya T V. Flat versus steep subduction: Contrasting modes for the formation and exhumation of high- to ultrahigh-pressure rocks in continental collision zones[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2011, 301(s 1–2):65–77.
- [154] Li Z H, Xu Z, Gerya T, et al. Collision of continental corner from 3-D numerical modeling[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2013, 380:98–111.
- [155] Li Z H, Liu M Q, Gerya T. Material transportation and fluid-melt activity in the subduction channel: Numerical modeling[J]. *Science China (Earth Science)*, 2015, 58(08):1–18.
- [156] Li Z H. A review on the numerical geodynamic modeling of continental subduction, collision and exhumation[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(1):47–69.
- [157] Nelson K D, Zhao W, Brown L D, et al. Partially molten middle crust beneath southern Tibet : Synthesis of project INDEPTH results[J]. *Science*, 1996, 274(5293):1684–1688.
- [158] Thomas J. Owens, Zandt G. Implications of crustal property variations for models of Tibetan plateau evolution[J]. *Nature*, 1997, 387(6628).
- [159] Roecker S W. Velocity structure of the Pamir-Hindu Kush Region: Possible evidence of subducted crust[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1982, 87(B2):945–959.
- [160] Negrodo A M, Replumaz A, Villaseñor A, et al. Modeling the evolution of continental subduction processes in the Pamir-Hindu Kush region[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2007, 259(1/2):212–225.
- [161] Mukherjee B K, Sachan H K, Ogasawara Y, et al. Carbonate-Bearing UHPM Rocks from the Tso-Morari Region, Ladakh, India: Petrological Implications[J]. *International Geology Review*, 2003, 2003(1): 49–69.