

青藏高原羌塘中部高压变质带的研究进展及存在问题

张修政¹, 董永胜², 王 强^{1,3,4}, 但 卫^{1,3}

ZHANG Xiuzheng¹, DONG Yongsheng², WANG Qiang^{1,3,4}, DAN Wei^{1,3}

1. 中国科学院广州地球化学研究所/同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640;

2. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061;

3. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101;

4. 中国科学院大学, 北京 100049

1. *State Key Laboratory of Isotope Geochemistry/Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China;*

2. *College of Earth Science, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China;*

3. *CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China;*

4. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

摘要:羌塘中部高压变质带是目前青藏高原内部延伸规模最大的高压变质带,是理解特提斯演化的关键地质记录。高压变质带主要沿龙木措-双湖-澜沧江缝合带一线出露,主要由榴辉岩、蓝片岩、石榴子石多硅白云母片岩及少量高压麻粒岩组成。其中,榴辉岩主要出露于戈木、果干加年山、冈玛错、巴青及滇西的勐库地区,主要呈透镜状产于石榴子石多硅白云母片岩中。除巴青地区的榴辉岩外,其余地区榴辉岩的峰期变质温度较低且含有硬柱石及其假象,峰期变质条件位于硬柱石榴辉岩相稳定区域,是洋壳冷俯冲的产物。虽然对于戈木地区榴辉岩锆石成因仍有争议,但已有资料显示,羌塘中部高压变质带主体变质时代集中在晚三叠世,其相关高压变质岩石的折返可能与洋盆的闭合及随后的陆-陆碰撞相关。近期研究表明,羌塘中部可能存在二叠纪低温高压变质岩,折返于大洋俯冲阶段,可能与洋岛或海山的俯冲及引发的俯冲侵蚀作用相关。此外,羌塘香桃湖地区出露早古生代的基性高压麻粒岩,是冈瓦纳大陆北缘陆块拼贴的记录。因此,对羌塘中部高压变质带进行进一步系统的研究工作,对于深入理解冈瓦纳北缘构造演化及古特提斯的俯冲与闭合过程具有重要的意义。

关键词:青藏高原;羌塘地块;榴辉岩;蓝片岩;古特提斯洋

中图分类号:P588.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2018)08-1406-11

Zhang X Z, Dong Y S, Wang Q, Dan W. High pressure metamorphic belt in central Qiangtang, Tibetan Plateau: Progress and unsolved problems. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(8):1406-1416

Abstract: A 500km-long high-pressure metamorphic belt has been documented in the central Qiangtang Block of northern Tibet, which is thought to have constituted the crucial geological archives of subduction and exhumation of Paleozoic-Tethys oceanic lithosphere. The high-pressure metamorphic rocks are mostly exposed along the Longmu Co-Shuanghu suture zone, and are composed of eclogites, blueschists, garnet-phengite-schists (Grt-Phn schists), and minor high-pressure mafic granulites. The eclogites in central Qiangtang are reported from Gemu, Guoganjianian Mt., Gangma Co, Baqing, and Mengku area, and occur mainly as blocks or small lenses in Grt-Phn schists. Apart from newly discovered Baqing eclogites, most eclogites from central Qiangtang Block are characterized by low peak temperatures and presence of lawsonite or pseudomorphs of epidote + paragonite, and their peak P-T results lie mainly in the lawsonite-eclogite field. The ages of most eclogites and blueschists from central Qiangtang block have been con-

收稿日期:2018-01-10;修订日期:2018-03-28

资助项目:国家重点研发计划《燕山期重大地质事件的深部过程与资源效应》(编号:2016YFC0600407)、国家自然科学基金项目《羌塘香桃湖地区与早古生代高压变质岩共生的多期深熔作用》(批准号:41502054)

作者简介:张修政(1985-),男,博士,副研究员,从事岩石学研究。E-mail: zhangxz@gig.ac.cn

strained as Late Triassic which are regarded as the results of closure of the Paleo-Tethys Ocean and following continental collision. Furthermore, the Permian high-pressure metamorphic rocks were also identified and their P-T-t paths revealed a complete evolutionary history for the subduction erosion in response to the subduction of seamounts (or oceanic islands). Moreover, the discovery of Silurian high-pressure granulites in the central Qiangtang block indicates the existence of a previous collisional event on the northern margin of the Indo-Australian Gondwana. Hence, further comprehensive studies of the high-pressure metamorphic belt in central Qiangtang will provide valuable insights into the tectonic evolution of the north margin of Gondwana during the early Paleozoic and the opening and closure of the Paleo-Tethys Ocean.

Key words: Tibetan Plateau; Qiangtang block; eclogite; blueschist; Paleo-Tethys Ocean

造山带中高压-超高压变质岩(如榴辉岩、蓝片岩、高压麻粒岩)记录了洋壳或陆壳俯冲、折返及大规模地壳加厚事件的关键地质信息,对识别古板块俯冲-碰撞造山作用、理解地球深部动力学过程、建立古造山带构造演化模式具有重要意义^[1-6]。羌塘中部高压变质带是龙木措-双湖-澜沧江板块缝合带的重要组成部分,主要沿缝合带一线分布,是青藏高原内部延伸规模最大、保存较好的高压变质带。主要由榴辉岩、蓝片岩、石榴子石多硅白云母片岩、蓝闪石大理岩、少量高压麻粒岩等组成。高压带西起红脊山^[7]和冈玛日^[8-11],经果干加年山^[12]、片石山^[13-15]、绒玛^[11,16],向东延伸到双湖^[17]和巴青地区^[18],断续出露超过 500km,可能一直延续到滇西的勐库地区^[19-22],记录了古特提斯洋复杂的俯冲消减历史及随后陆-陆碰撞的关键演化信息^[6,13-14,23],是龙木措-双湖-澜沧江板块缝合带作为古特提斯主洋盆闭合遗迹、冈瓦纳大陆和欧亚大陆界线^[24-28]的重要依据。因此,对羌塘中部高压变质带进行深入的研究工作,对全面理解古特提斯洋俯冲消减历史、构建冈瓦纳大陆和欧亚大陆碰撞演化模式具有重要的意义。

然而,羌塘中部恶劣的自然条件和复杂的人文因素,限制了很多研究者的进入及广泛研究工作的开展。因此,相对于苏鲁-大别等其他高压变质带,羌塘中部高压变质带的研究程度及关注度较低。本文介绍羌塘中部高压变质带的基本特征、研究历史,以及近年来的一系列进展,重点探讨高压带在岩石成因和构造机制研究中遇到的部分问题,并阐述研究思路及初步解释。

1 区域地质概况

羌塘位于青藏高原北部,夹持于班公湖-怒江缝合带和金沙江缝合带之间(图 1-a),是研究特提斯与冈瓦纳北缘演化的关键区域。李才^[24]首次提出

羌塘中部存在一条重要的构造带,命名为龙木措-双湖-澜沧江板块缝合带(图 1),并认为其代表了冈瓦纳大陆和欧亚大陆的界线。随后, Metcalfe^[26-27]进行了系统的地质和古生物研究,发现二叠纪冰海杂砾岩及冈瓦纳属性的冷水生物群主要分布在相当于龙木措-双湖-澜沧江缝合带以南的广大区域,同时代的暖水生物化石分布在缝合带以北,暗示龙木措-双湖-澜沧江缝合带是一条能够分隔不同地理环境及古生物区系的重要地质界线。近年来,缝合带一线大量蛇绿岩的发现及相关研究的开展,为羌塘中部古洋盆的存在及演化历史的研究提供了重要的岩石记录^[29-33]。主量、微量元素及 Sr-Nd-Hf-O 同位素资料显示,羌塘中部的蛇绿岩兼具洋中脊(MOR)和俯冲带(SSZ)的地球化学特征^[29-30],大量高精度年代学工作则揭示其形成时代可以从寒武纪一直延续到二叠纪(505~275Ma)^[29-33],可能代表了一个连续演化的洋盆^[32]或是保留了原特提斯(冈瓦纳北缘早古生代洋盆)及古特提斯多阶段洋盆演化的记录^[29,34]。羌塘中部晚泥盆世-晚三叠世弧岩浆岩的发现^[35-38]及低温高压变质带的确定^[6-23,39-41],为与古特提斯洋俯冲相关的岩浆活动及复杂动力学过程的研究提供了重要的资料。结合区域内二叠纪-三叠纪洋岛玄武岩^[42-43]、泥盆纪和二叠纪放射虫硅质岩^[44],以及晚三叠世后碰撞岩浆的研究^[45],进一步完善了大洋演化及最终闭合阶段的地质历史,使龙木措-双湖-澜沧江缝合带作为古特提斯洋主洋盆遗迹的认识得到更多支持^[28-30,37,46]。

沿龙木措-双湖-澜沧江缝合带一线可以将羌塘进一步划分为羌南-宝山地块和羌北-昌都地块 2 个次级地块(下文简称为南羌塘和北羌塘)(图 1-b)。北羌塘地区泥盆纪-三叠纪地层均有不同程度出露(图 1-b),其上石炭统日湾茶卡组灰岩中产典型的 *Guizhouphyllum-Yuanophyllum* 珊瑚等化石组合(图 2-d),显示杨子地区的亲缘性^[47-50],砂

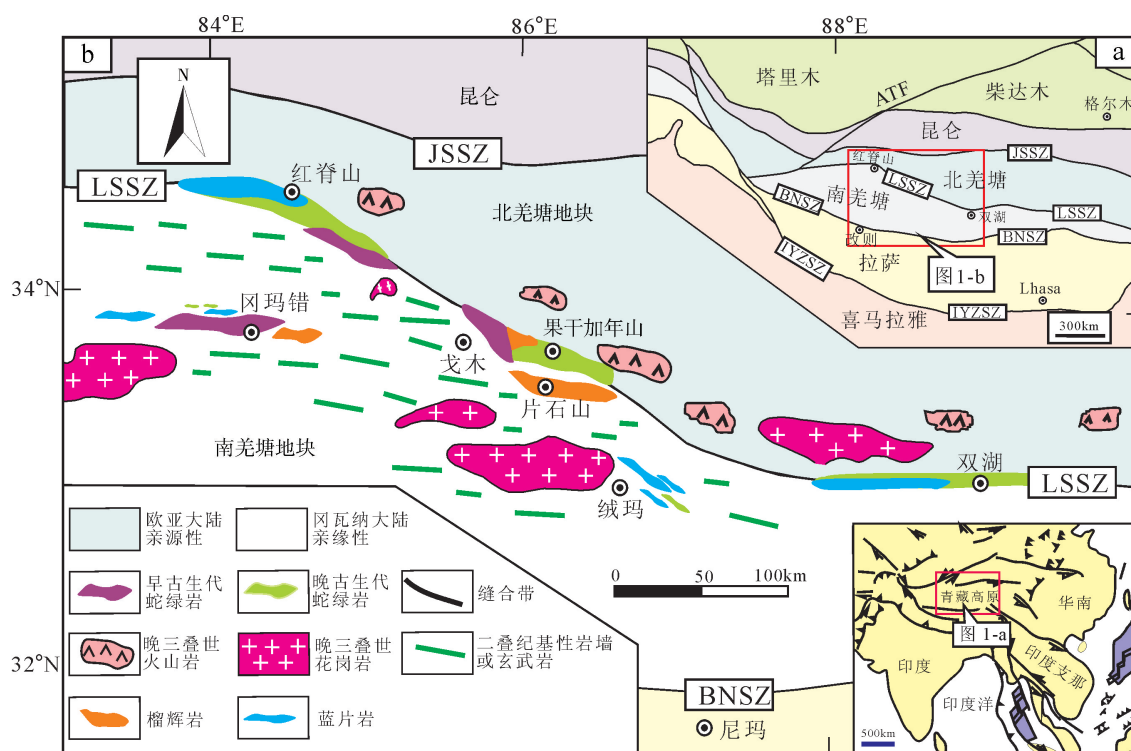


图1 羌塘地区地质简图(据参考文献[6]修改)

Fig. 1 Simplified geod geological map of Qiangtang area

JSSZ—金沙江缝合带;LSSZ—龙木错—双湖—澜沧江缝合带;BNSZ—班公湖—怒江缝合带;
IYZSZ—印度—雅鲁藏布江缝合带

岩夹层的物源分析表明其具有早石炭世的碎屑锆石峰值(图2-c、d)^[50],且大部分碎屑锆石来源于与地层沉积时代相近的中酸性岩浆岩^[51],与当今俯冲带环境(海沟、弧前和弧后盆地)沉积岩物源特征相似^[52],暗示北羌塘至少在早石炭世已转变为典型的活动大陆边缘(图2-f)。南羌塘地区奥陶系—二叠系发育齐全,沉积建造和生物面貌可与申扎地区对比。其中上石炭统—二叠统(展金组)在南羌塘大面积出露(图1-b),是一套以碎屑岩为主的被动大陆边缘沉积,含冷水型生物和冰海杂砾岩(图2-b),代表塔尔切尔冰期影响的时间和空间,显示了冈瓦纳大陆的亲缘性^[47-49]。冰海杂砾岩及同时代的变质砂岩中碎屑锆石来自相对古老的源区(图2-a、b),说明其沉积在缺少中酸性岩浆活动的被动大陆边缘背景(图2-f)。此外,南羌塘晚古生代地层中普遍发育大量二叠纪基性岩墙群(图1-b),为冈瓦纳北缘二叠纪地幔柱活动及相关裂解事件的产物^[53-54]。

2 羌塘高压变质带研究概况

羌塘地区高压变质岩的报道最早始于1915年,著名的瑞典探险家Sven Hening在穿越西藏无人区时首次发现并报道了果干加年山地区的蓝片岩^[55],但是这例蓝片岩的存在至今未被证实。笔者推测,Sven Hening所谓的“蓝片岩”很可能就是董永胜等^[12]在果干加年山发现的细粒榴辉岩。李才^[24]首次报道了双湖恰格勒拉地区的蓝片岩,随后国内外学者陆续在冈玛日、绒玛、角木查尔日、双湖、红脊山等地区发现了新的蓝片岩露头,并进行了初步的同位素定年工作^[7-11,16-17,24,56]。羌塘中部的蓝片岩主要由蓝闪石、青铝闪石、蓝透闪石、多硅白云母、钠长石,以及绿泥石等矿物组成。其中,绒玛地区蓝片岩出露规模最大,与蓝片岩伴生的大理岩中也含有少量蓝闪石(图版I-a),部分蓝片岩含有石榴子石,可能为榴辉岩强烈退变的产物;红脊山地区的蓝片岩则含有典型的硬柱石,形成于低的地温梯度

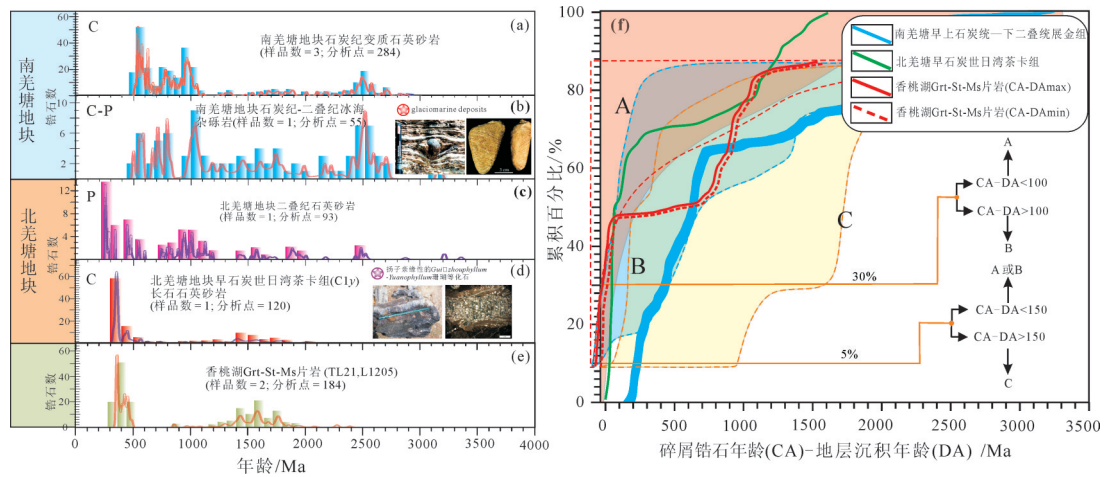


图 2 羌塘地区石炭纪—二叠纪地层碎屑锆石年龄分布及构造环境判别图解(据参考文献[50-51]修改)
 Fig. 2 Summary of detrital zircon age distribution from standard strata of southern and northern Qiangtang Blocks (a~e) and discrimination diagram of detrital zircon age patterns for determining their tectonic settings(f)
 a、b—南羌塘地块石炭纪—二叠纪代表性地层碎屑锆石年龄分布图;c、d—北羌塘地块石炭纪—二叠纪代表性地层碎屑锆石年龄分布图;e—与俯冲侵蚀作用相关的变质沉积岩碎屑锆石年龄分布图;f—羌塘地区碎屑锆石构造环境判别图解;
 Grt—石榴子石;St—十字石;Ms—白云母;A—活动大陆边缘;B—碰撞造山带;C—被动大陆边缘

和快速的折返过程^[7-11,16-17,24,56]。蓝片岩峰期变质条件为 $p=0.8\sim 1.5\text{GPa}$, $T=330\sim 420^\circ\text{C}$ ^[8,11,16,57], 大部分蓝片岩的单矿物(蓝闪石和多硅白云母)⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年结果集中在 223~216Ma^[6,11,56-57], 少数蓝片岩(冈玛错地区)获得早二叠世蓝闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄信息(282~275Ma)^[8]。

羌塘中部戈木地区榴辉岩的发现是近年来青藏高原基础地质研究的重大进展之一。李才等^[13]首次报道了羌塘中部戈木地区的榴辉岩(图版 I-b), 随后董永胜等^[11]和翟庆国等^[10]分别在果干加年山(图版 I-c)和西部的冈玛错地区(图版 I-d)陆续发现了新的榴辉岩露头。详细的野外地质调查表明, 羌塘中西部地区的榴辉岩均呈透镜状产于石榴子石多硅白云母片岩中(图版 I-b、c), 少量榴辉岩与大理岩伴生(图版 I-d)。系统的岩石学及变质作用研究揭示, 榴辉岩变质峰期条件为 $P=2.0\sim 2.5\text{GPa}$, $T=410\sim 460^\circ\text{C}$, 均属于低温型榴辉岩^[6,10,12]。戈木地区榴辉岩高精度(SHRIMP 和 SIMS)锆石 U-Pb 定年结果为 237~232Ma, 在误差范围内与石榴子石 Lu-Hf 定年结果(244~233Ma)一致, 且锆石中含有榴辉岩相变质矿物包裹体, 被认为代表了峰期变质作用时代^[6,58-59]。单矿物⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年结果揭示了高压带的快速折返和退变发生在

227~203Ma^[6,13,16,40]。随着研究的深入, 近期在缝合带东部的巴青地区及滇西勐库地区均发现了新的榴辉岩露头^[18-22]。巴青地区榴辉岩出露于巴青县城北东 70km 的混杂岩带中, 榴辉岩峰期矿物组合为石榴子石+绿辉石+金红石+多硅白云母+石英, 与羌塘中西部地区榴辉岩一致, 记录的峰期变质条件为 $p\sim 2.5\text{GPa}$, $T\sim 730^\circ\text{C}$, 峰期变质时代约为 223Ma^[18]。滇西双江勐库地区的退变质榴辉岩主要呈构造透镜体产于奥陶纪湾河蛇绿混杂岩中(图版 I-e), 直接围岩为白云母石英片岩, 经历了强烈的退变质作用(图版 I-f), 具有典型的硬柱石榴辉岩相峰期矿物组合特征, 峰期温压条件的估算显示其可能经历了超高压变质作用^[19-22], 但需要进一步的工作证实。根据目前已发表的文献和笔者掌握的资料, 勐库榴辉岩的变质峰期时代约为 230Ma, 具有类似 OIB 的地球化学特征^[21], 与中部戈木地区的榴辉岩一致, 可能是羌塘中部高压变质带的东延部分。

3 存在问题

3.1 戈木榴辉岩锆石的成因问题

锆石中矿物包裹体的确定结合相应微区精细的 U-Pb 定年被认为是确定榴辉岩复杂变质演化历史的有效手段, 在苏鲁-大别等高压-超高压变质带

图版 I Plate I



a. 绒玛地区蓝片岩宏观露头, 与蓝闪石大理岩伴生产; b. 戈木片石山榴辉岩野外特征, 呈透镜状产于石榴子石多硅白云母片岩中; c. 果干加年山榴辉岩, 与片石山榴辉岩特征相似; d. 冈玛错榴辉岩, 呈孤立的块状产于大理岩中; e. 滇西的勐库榴辉岩, 以透镜状产于白云母片岩中, 在河流深切处出露较好; f. 勐库榴辉岩近景照片, 石榴子石边部具有“白眼圈”等退变结构

年代学研究中取得了很多重要的进展, 目前已被广泛应用于全球大部分变质岩年代学研究中^[34,60-61]。然而, 这种通用的变质年代学方法在羌塘戈木榴辉岩变质时代的研究中遇到了新的问题, 并引出2种截然相反的认识。

戈木地区榴辉岩中锆石呈自形板柱状晶形, 在

阴极发光(CL)图像上具有无环带或宽缓条带状环带特征(图3-a), 与典型的基性岩岩浆锆石十分相似^[62]。然而, 这些锆石中含有大量的变质矿物包裹体, 如石榴子石、绿辉石、金红石、多硅白云母等(图3-a), 且这些含包裹体的锆石并没有明显的裂隙^[6,58]。基于上述包裹体的研究, 主流观点仍然认为

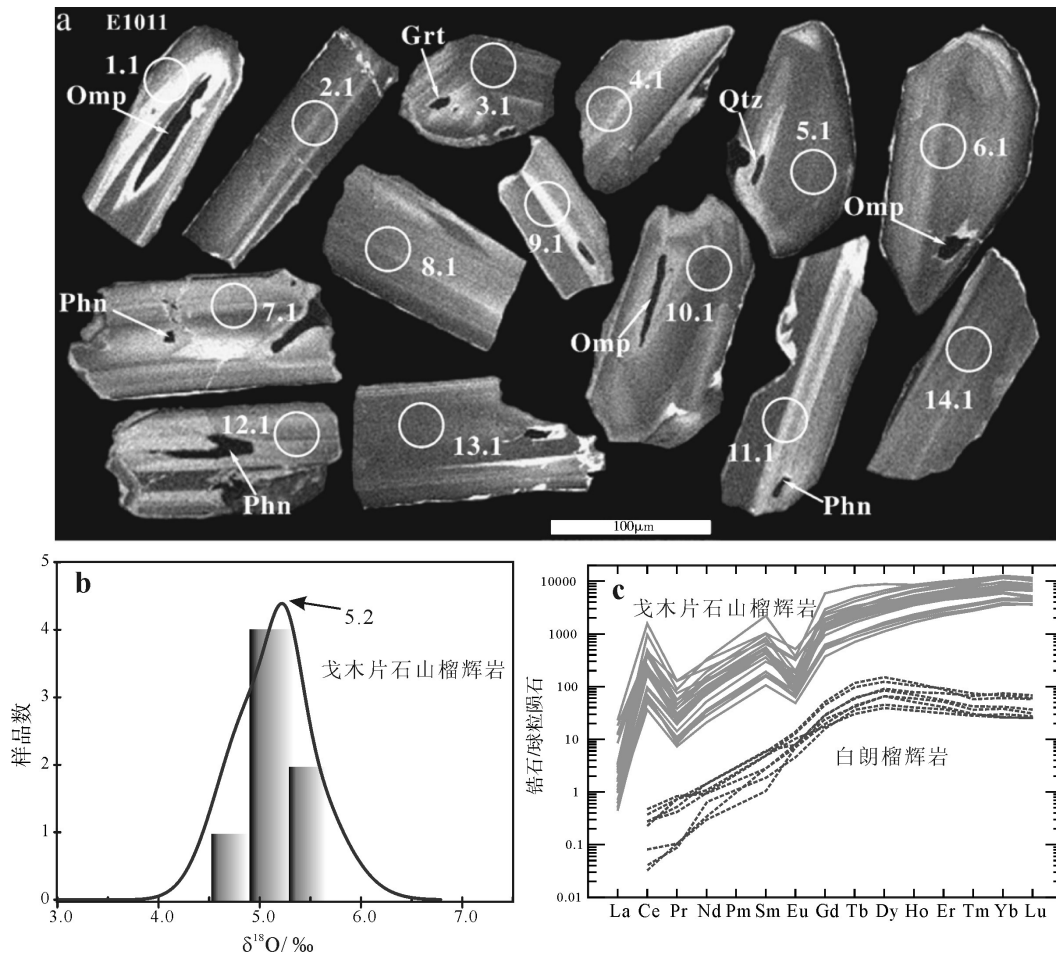


图 3 羌塘戈木片石山榴辉石锆石阴极发光(CL)图像与矿物包裹体^[13](a)、氧同位素(b)和稀土元素特征^[62](c)

Fig. 3 CL images showing the internal structure of zircon grains and the mineral inclusions(a),SIMS zircon O isotopic ratios(b) and zircon REE patterns(c) for the Pianshishan eclogites
Grt—石榴子石;Omp—绿辉石;Phn—多硅白云母;Qtz—石英

这些锆石为变质成因,在其增生过程中捕获了榴辉岩峰期的细小矿物,锆石 U-Pb 年龄(237~232Ma)代表了榴辉岩相峰期变质作用的时代^[6,58]。Dan 等^[62]从微量元素及同位素研究角度对戈木榴辉岩锆石开展了系统研究,结果表明,戈木榴辉岩的锆石具有高的 Th、U 含量及 Th/U 值(大部分大于 1);氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $5.2\text{‰} \pm 0.6\text{‰}$ (2SD)(图 3-b),类似于亏损地幔($5.3\text{‰} \pm 0.6\text{‰}$ ^[63]);锆石稀土元素配分模式具有正的 Ce 和负的 Eu 异常,不亏损重稀土元素,与典型榴辉岩相变质锆石(正的 Eu 异常或无异常,明显亏损重稀土元素)具有显著的差异(图 3-c);锆石 Ti 温度为 $721\sim 856^\circ\text{C}$,明显高于榴辉岩峰期变质温度(约 500°C)。综合这些特征,Dan 等^[62]认为,戈木

榴辉岩中的锆石均为原岩的岩浆锆石,锆石中变质矿物包裹体可能是晚期通过裂隙或其他途径进入锆石内部的。因此,其锆石年龄(约 238Ma)代表了榴辉岩原岩形成的时代而非榴辉岩变质峰期的时代。随着近期羌塘中部中三叠世(约 239Ma)基性岩墙(与戈木榴辉岩具有类似地球化学特征)的发现(但卫等,待发表资料),锆石岩浆成因的可能性也进一步增加。

笔者认为,这 2 种观点均基于不同的角度对锆石年代学资料做出了合理的解释,具有一定的证据链支撑,但也存在一定的问题。变质成因观点需要进一步解决锆石的成因机制问题,如在未达到超临界流体条件时,普通的低温变质流体的微量元素含量

极低^[64],在这种低元素丰度变质流体中如何结晶出与岩浆锆石类似微量元素丰度的变质锆石?在缺少斜长石及富含石榴子石的榴辉岩相变质条件下,生长的锆石为何会具有显著的负Eu异常及重稀土元素的相对富集?变质锆石通常在有限的结晶空间(岩石基本为固态)增生导致其具有多晶面的特征,通常呈现次圆状或不规则状特征^[34],而戈木榴辉岩为何会在变质增生过程中形成自形的晶体?另一方面,岩浆成因学说则需要解决变质矿物包裹体进入锆石(其无明显裂隙)的机制问题并找出确切的矿物学证据,比如,为原岩岩浆矿物包裹体被高压变质流体交代的产物,还是峰期细小变质矿物“压”入锆石后裂隙的愈合?当然,无论哪种观点最终被证实,戈木榴辉岩锆石成因机制的解决都将对变质岩石学基础理论的发展具有重要的意义。

3.2 羌塘榴辉岩的峰期变质条件

羌塘中部的戈木榴辉岩发现最早、研究程度最高,同时也是目前争议最大的榴辉岩^[6,65]。除了锆石成因的争论,另一方面的争议主要集中在其峰期变质条件上,即是低温榴辉岩还是中-高温榴辉岩?前人在系统的矿物学研究基础上,利用地质温压力计对戈木地、果干加年山及冈玛错地区的榴辉岩峰期变质条件进行了限定,其结果表明,这些榴辉岩峰期变质温度一般不超过500℃,峰期压力条件集中在2.0~2.5GPa,相当于典型的硬柱石榴辉岩温压条件,是洋壳冷俯冲的产物^[6,10,12]。苑婷媛等^[65]利用Perple_x程序对戈木地区榴辉岩进行了相平衡模拟,同时结合金红石锆温度计计算结果,认为戈木地区榴辉岩的峰期变质温度接近700℃,变质压力仅约1.7GPa,对应较高的俯冲地温梯度,暗示戈木榴辉岩并非形成于冷俯冲过程。榴辉岩的峰期变质条件不仅关系到对俯冲板片热机制的理解,还制约了很多年代学资料的解释。比如,金红石是羌塘榴辉岩峰期重要的组成矿物,目前获得金红石SIMS定年结果约为218Ma^[58],如果榴辉岩峰期温度小于或与金红石U-Pb封闭温度接近(约600℃或稍低)^[66-67],那么金红石的U-Pb年龄应该代表了榴辉岩的变质峰期时代。尤其是在羌塘中部榴辉岩的锆石成因存在争议、石榴子石普遍发育复杂的生长环带^[6]、其Lu-Hf年龄可能偏老^[68]的情况下,金红石的SIMS U-Pb定年可能是确定羌塘中部榴辉岩峰期变质时代的最佳途径。反之,如果证实榴辉岩峰

期变质温度接近700℃,甚至更高,那么金红石的U-Pb年龄即代表榴辉岩折返过程的冷却及退变质时代。

不论是相平衡模拟还是传统的地质温压计的估算都要以基础的矿物组合及矿物转变关系为基础。翟庆国^[69]在戈木地区榴辉岩中发现了钠云母+绿帘石组成的硬柱石假象,暗示峰期硬柱石的存在。李静等^[22]在高压带东延的勐库榴辉岩中亦发现了典型的硬柱石及大量的硬柱石假象(钠云母+绿帘石+钠长石集合体),结合西部红脊山硬柱石蓝片岩的报道,说明羌塘高压变质带整体应形成于相对冷的俯冲体制。另外,Zhai等^[13]研究表明,戈木榴辉岩中石榴子石进变质区域含有蓝闪石包裹体,董永胜等^[39]报道了退变榴辉岩中绿辉石→蓝闪石→冻蓝闪石连续转变的矿物结构,这些矿物信息暗示戈木榴辉岩经历了相对冷的俯冲和折返过程,与传统地质温压计构建的P-T轨迹吻合^[6],与相平衡估算^[65]的相对高的地温梯度下矿物演化存在显著差异。

金红石是羌塘榴辉岩中峰期变质条件下的常见平衡共生矿物,近期研究表明,金红石中Zr元素含量与其形成温度有良好的线性关系,可作为金红石形成温度的温度计^[70-72],因此对羌塘榴辉岩中金红石进行微量元素含量测定及锆温度计计算,可以进一步限定榴辉岩峰期的变质温度。金红石中Zr含量的分析目前常用的方法有电子探针和LA-ICP-MS。需要强调的是,在常规矿物主量元素分析条件下,电子探针的检测限为 $200 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$,远大于大部分微量元素含量,因此需要通过延长测试时间、优化背景峰位,提高探针电流等一系列改进措施提高探针的检测限^[73-74]。在实际的研究中,改进分析条件后的电子探针与LA-ICP-MS分析结果相近,均能对不同成因的金红石的Zr含量进行很好地限定^[75-76]。苑婷媛等^[65]获得的金红石锆温度计结果集中在600~700℃,但是其数据很可能来源于常规的电子探针矿物主量元素分析(参见其方法描述),具有较大的误差。笔者对戈木和果干加年山地区榴辉岩中峰期金红石进行了微量元素LA-ICP-MS分析,结果表明,榴辉岩中金红石具有十分低的Zr含量($37 \times 10^{-6} \sim 58 \times 10^{-6}$),对应了低的峰期温度(462~581℃)(表1),与石榴子石-单斜辉石温度计估算的峰期温度一致^[6,10,12],进一步证明羌塘地区的榴辉岩是冷俯冲的产物。

3.3 多期次高压变质事件及其地质意义

随着研究资料的进一步积累,除晚三叠世的低温高压变质事件外,羌塘中部其他时代的高压变质岩亦被陆续发现并报道。Zhang 等^[34]首次报道了羌塘中部香桃湖地区的早古生代基性高压麻粒岩,研究表明,高压麻粒岩峰期变质条件为 $T=830\sim 860^{\circ}\text{C}$, $p=1.15\sim 1.45\text{GPa}$, 峰期变质时代为 $427\sim 422\text{Ma}$, 具有近等温降压的顺时针 $p-T-t$ 轨迹, 显示了造山带高压麻粒岩的典型特征。大量的资料显示,冈瓦纳大陆在聚合之后北缘形成了一个早古生代活动大陆边缘^[77-78], 而羌塘是其北缘的重要组成部分, Zhang 等^[34]根据羌塘中部志留纪高压麻粒岩的研究结果, 认为冈瓦纳大陆北缘在早古生代不仅经历了安第斯型的俯冲增生过程, 还可能存在着大量的微陆块(或弧地体)陆续向冈瓦纳北缘的碰撞增生。因此, 羌塘中部不仅保留了古特提斯洋主洋盆的演化记录, 同时还可能残留少量冈瓦纳北缘早古生代构造演化信息^[29]。

近年来,大量高精度的年代学及数值模拟证据显示,同一高压变质带内亦可以保留多期次的俯冲与折返信息^[79-82]。因为榴辉岩的折返不仅能够发生在洋壳俯冲消减结束后陆-陆碰撞初始阶段(如西阿尔卑斯), 还可以发生在大洋俯冲过程中^[82]。例

如,班公湖-怒江特提斯洋的闭合时间为晚侏罗世一早白垩世^[83-84], 但班-怒带洞错地区的洋壳榴辉岩在 $177\sim 167\text{Ma}$ 已经开始折返, 并经历了麻粒岩相变质作用叠加及复杂的退变质演化过程^[85], Zhang 等^[85]认为,班-怒带榴辉岩的折返及复杂的变质演化与中生代大洋高原的俯冲密切相关。此外,在现今的环太平洋俯冲带中亦存在很多高压变质岩石, 在没有弧-陆或陆-陆碰撞作用的促进下也能够折返至地表^[82]。事实上,根据目前已发表的资料,羌塘中部高压变质带可能保留了不同阶段高压变质岩石的演化信息, 如邓希光等^[8]在高压带西段冈玛日和桃形湖地区获得 275Ma 和 282Ma 的蓝闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄;赵靖等^[86]在滇西的栗义蓝片岩中识别出约 279Ma 的蓝闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄信息; Zhang 等^[51]在香桃湖地区发现了一套特殊的石榴子石十字石云母片岩,石榴子石中包裹体暗示其早期经历了蓝片岩相低温高压变质作用,随后在折返底辟过程中遭受角闪岩相变质作用叠加,其晚期的冷却时代为 $263\sim 259\text{Ma}$, 进一步暗示羌塘中部可能保留不同折返期次的高压变质岩石。初步研究表明,这些不同期次的高压变质岩可能具有不同的成因机制、变质演化历史、原岩建造。早期折返的高压变质岩石可能与洋岛或海山等的俯冲及引发的俯冲侵蚀相关^[51], 其

表 1 羌塘中部榴辉岩中金红石微量元素含量及金红石锆温度计计算结果

Table 1 LA-ICP-MS analyses of trace elements in rutile grains and peak temperature estimated by zircon-in-rutile thermometer of eclogites from central Qiangtang

元素	GZ85-1 片石山	GZ85-14 片石山	CM14073-1 果干加年山	CM1407-2 果干加年山	CM1407-3 果干加年山	CM1407-4 果干加年山	CM1407-5 果干加年山
Sc	1.63	0.80	1.78	1.15	0.98	1.09	1.24
V	1478	1594	914	893	906	933	908
Cr	40.8	30.6	282	817	464	340	383
Ni	0.00	0.34	0.06	0.34	0.60	0.09	0.36
Y	0.04	0.04	0.06	0.04	0.04	0.03	0.04
Zr	58.4	39.7	41.0	45.8	37.1	37.1	41.5
Nb	421	468	116	189	106	121	127
Hf	2.41	1.72	2.36	3.04	2.32	2.24	2.29
Ta	23.0	29.4	10.3	20.6	8.11	9.17	10.2
Pb	0.05	0.00	0.10	0.06	0.05	0.05	0.08
$T^{[70]}$	523	471	475	490	462	462	477
$T^{[71]}$	526	503	505	511	499	499	506
$T^{[72]}$	581	557	550	565	553	553	559

注:金红石 Zr 含量 LA-ICP-MS 测试在中国科学院广州地球化学研究所完成,测试条件及方法同文献^[75-76],计算预设压力为 2.0GPa

原岩可能为少量洋岛玄武岩^[8]、俯冲带上盘的活动大陆边缘沉积(图3-e)、岛弧岩浆岩等^[51]。晚期折返的高压变质岩可能与洋盆的闭合及最终的陆-陆碰撞相关,其原岩主要为部分洋壳和南羌塘被动大陆边缘的物质^[23]。但是由于区域内精细的变质作用演化(尤其是高质量相平衡模拟)和系统同位素地球化学工作的缺乏,古特提斯洋俯冲与闭合过程复杂的构造演化历史还不能很好地限定。在下一步的工作中,对羌塘中部不同折返期次、不同成因、不同原岩属性的高压变质岩石进行系统的研究,对于进一步深入理解冈瓦纳北缘及古特提斯洋俯冲与闭合过程具有重要的意义。

4 结论

(1)羌塘中部戈木地区榴辉岩中锆石具有典型的基性岩浆岩锆石的形态、阴极发光图像、微量元素、同位素特征,但含有典型的榴辉岩相变质矿物包裹体。其成因及锆石年代的意义仍存在巨大争议。

(2)硬柱石矿物及其假象的存在、绿辉石退变结构、金红石锆温度计估算结果表明,羌塘中部大多数高压变质岩具有低的峰期变质温度,榴辉岩的峰期变质条件位于典型的硬柱石榴辉岩相稳定区域,是洋壳冷俯冲的产物。

(3)羌塘中部不仅保留了与古特提斯洋复杂演化过程相关的多期高压变质记录,同时还可能还残留早古生代冈瓦纳大陆北缘大洋演化及相关碰撞事件的信息。

致谢:谨以此文祝贺尊敬的导师李才教授光荣退休及从事青藏高原研究工作三十余年,祝先生健康长寿!

参考文献

- [1]Carswell D A. Eclogite Facies Rocks[M]. New York: Blackie, 1990.
- [2]Carswell D A, O'Brien P J. Thermobarometry and geotectonic significance of high-pressure granulites: examples from the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif in Lower Austria[J]. *Journal of Petrology*, 1993, 34(3): 427-459.
- [3]Ernst W G, Liou J G. Contrasting plate-tectonic styles of the Qinling-Dabie-Sulu and Franciscan metamorphic belts[J]. *Geology*, 1995, 23:353-356.
- [4]Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. High-pressure granulites (retrograded eclogites) from the Hengshan Complex, North China Craton: petrology and tectonic implications[J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42(6): 1141-1170.
- [5]Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited[J]. *Precambrian Research*, 2005, 136:177-202.
- [6]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.
- [7]陆济璞,张能,黄位鸿,等.藏北羌塘中北部红脊山地区蓝闪石+硬柱石变质矿物组合的特征及其意义[J]. *地质通报*, 2006, 25(1): 70-75.
- [8]邓希光,丁林,刘小汉,等.藏北羌塘中部冈玛日-桃形错蓝片岩的发现[J]. *地质科学*, 2000, 35(2): 227-232.
- [9]邓希光,丁林,刘小汉,等.青藏高原羌塘中部蓝片岩的地球化学特征及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2002,18(4): 517-525.
- [10]翟庆国,王军,王永.西藏改则县冈玛错地区发现榴辉岩[J]. *地质通报*, 2009, 28(12):1720-1724.
- [11]翟庆国,李才,董永胜,等.西藏羌塘中部荣玛地区蓝片岩岩石学、矿物学和Ar-Ar年代学[J]. *岩石学报*, 2009, 25(9):2281-2288.
- [12]董永胜,李才.藏北羌塘中部果干加年山地区发现榴辉岩[J]. *地质通报*, 2009, 28(9):1197-1200.
- [13]李才,翟庆国,董永胜,等.青藏高原羌塘中部发现榴辉岩及其意义[J]. *科学通报*, 2006, 25(1/2):70-75.
- [14]Zhai Q G, Jahn B M, Zhang R Y, et al. Triassic subduction of the Paleo-Tethys in northern Tibet, China: evidence from the geochemical and isotopic characteristics of eclogites and blueschists of the Qiangtang Block[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42: 1356-1370.
- [15]张修政,董永胜,施建荣,等.羌塘中部龙木错-双湖缝合带中硬玉石榴石二云母片岩的成因及意义[J]. *地学前缘*, 2010,17(1): 93-103.
- [16]Kapp P, An Y, Manning C E, et al. Tectonic evolution of the early Mesozoic blueschist-bearing Qiangtang metamorphic belt, central Tibet[J]. *Tectonics*, 2003, 22(4). DOI: 10.1029/2001TC001332.
- [17]鲍佩声,肖序常,王军,等.西藏中北部双湖地区蓝片岩带及其构造涵义[J]. *地质学报*, 1999, 73(4): 302-314.
- [18]Zhang Y X, Jin X, Zhang K J, et al. Newly discovered late triassic baqing eclogite in central tibet indicates an anticlockwise west-east qiangtang collision[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1). DOI:10.1038/s41598-018-19342-w.
- [19]徐桂香,曾文涛,孙载波,等.滇西双江县勐库地区(退变)榴辉岩的岩石学、矿物学特征[J]. *地质通报*, 2016, 35(7):1035-1045.
- [20]陈光艳,徐桂香,孙载波,等.滇西双江县勐库地区退变质榴辉岩中闪石类矿物的成因研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 2017, 36(1): 36-47.
- [21]孙载波,李静,周坤,等.滇西双江县勐库地区退变质榴辉岩的岩石地球化学特征及其地质意义[J]. *现代地质*, 2017, 31(4): 746-756.
- [22]李静,孙载波,黄亮,等.滇西勐库退变质榴辉岩的*P-T-t*轨迹及地质意义[J]. *岩石学报*, 2017, 33(7): 2285-2301.
- [23]张修政,董永胜,李才,等.从洋壳俯冲到陆壳俯冲和碰撞:来自羌塘中西部地区榴辉岩和蓝片岩地球化学的证据[J]. *岩石学报*,

- 2014, 30(10):2821–2834.
- [24]李才. 龙木错–双湖–澜沧江板块缝合带与石炭二叠纪冈瓦纳北界[J]. 长春地质学院学报, 1987, 17(2): 155–166.
- [25]李才. 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, 2008, 54(1):104–119.
- [26]Metcalf I. Origin and assembly of Southeast Asian continental terranes[C]//Audley–Charles M G, Hallam A. Gondwana and Tethys. Geological Society of London Special Publication, 1988, 37: 101–118.
- [27]Metcalf I. Gondwanaland origin, dispersion, and accretion of East and Southeast Asian continental terranes[J]. Journal of South American Earth Sciences, 1994, 7: 333–347.
- [28]Metcalf I. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 66: 1–33.
- [29]Zhang X Z, Dong Y S, Wang Q, et al. Carboniferous and Permian evolutionary records for the Paleo–Tethys Ocean constrained by newly discovered Xiangtaohu ophiolites from central Qiangtang, central Tibet[J]. Tectonics, 2016, 35:1670–1686.
- [30]Zhai Q G, Jahn B M, Wang J, et al. The Carboniferous ophiolite in the middle of the Qiangtang terrane, Northern Tibet: SHRIMP U–Pb dating, geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic characteristics[J]. Lithos, 2013,168/169:186–199.
- [31]李才, 翟庆国, 董永胜, 等. 冈瓦纳大陆北缘早期洋壳信息——来自青藏高原羌塘中部早古生代蛇绿岩依据[J]. 地质通报, 2008, 27(10):1602–1612.
- [32]Zhai Q G, Jahn B M, Wang J, et al. Oldest paleo–tethyan ophiolitic mélangé in the Tibetan plateau[J]. Geological Society of America Bulletin, 2016, 128(3/4): 355 – 373.
- [33]Hu P Y, Li C, Wu Y W, et al. Opening of the Longmu Co–Shuanghu–Lancangjiang ocean: constraints from plagiogranites[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(25): 3188–3199.
- [34]Zhang X Z, Dong Y S, Li C, et al. Silurian high – pressure granulites from Central Qiangtang, Tibet: Constraints on early Paleozoic collision along the northeastern margin of Gondwana[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2014, 405: 39–51.
- [35]Zhai Q G, Jahn B M, Su L, et al. Triassic arc magmatism in the qiangtang area, northern tibet: zircon u–pb ages, geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic characteristics, and tectonic implications[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 63:162–178.
- [36]Jiang Q Y, Li C, Su L, et al. Carboniferous arc magmatism in the Qiangtang area, Northern Tibet: Zircon U–Pb ages, geochemical and Lu–Hf isotopic characteristics, and tectonic implications[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015,100:132–144.
- [37]Dan W, Wang Q, Zhang X Z, et al. Magmatic record of late devonian arc–continent collision in the northern qiangtang, Tibet: implications for the early evolution of east paleo–tethys ocean[J]. Lithos, 2018, 308/309: 104–117.
- [38]Liu J H, Xie C M, Li C, et al. Early Carboniferous adakite–like and I–type granites in central Qiangtang, northern Tibet: Implications for intra–oceanic subduction and back–arc basin formation within the Paleo–Tethys Ocean[J]. Lithos, 2018, 296/299: 265–280.
- [39]董永胜, 李才, 施建荣, 等. 羌塘中部高压变质带的退变质作用及其构造侵位[J]. 岩石学报, 2009, 25(9), 2303–2309.
- [40]张修政, 董永胜, 李才, 等. 青藏高原羌塘中部不同时代榴辉岩的识别及其意义——来自榴辉岩及其围岩 ^{40}Ar – ^{39}Ar 年代学的证据[J]. 地质通报, 2010, 29(12):1815–1824.
- [41]张修政, 董永胜, 李才, 等. 青藏高原羌塘中部榴辉岩地球化学特征及其大地构造意义[J]. 地质通报, 2010, 29(12):1804–1814.
- [42]翟庆国, 李才, 黄小鹏. 西藏羌塘中部角木日地区二叠纪玄武岩的地球化学特征及其构造意义[J]. 地质通报, 2006, 25(12): 1419–1427.
- [43]Fan J J, Li C, Xie C. et al. Remnants of Late Permian–Middle Triassic ocean islands in northern Tibet: implications for the late–stage evolution of the Paleo–Tethys ocean[J]. Gondwana Research, 2017, 44:7–21.
- [44]朱同兴, 张启跃, 董瀚, 等. 藏北双湖才多茶卡一带构造混杂岩中新发现晚泥盆世和晚二叠世放射虫硅质岩[J]. 地质通报, 2006, 25(12):1413–1418.
- [45]张修政, 董永胜, 李才, 等. 羌塘中部晚三叠世岩浆活动的构造背景及成因机制——以红脊山地区香桃湖花岗岩为例[J]. 岩石学报, 2014,30(2):547–564.
- [46]Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y, et al. The origin and pre–Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau[J]. Gondwana Research, 2013, 23 (4): 1429–1454.
- [47]李才, 黄小鹏, 翟庆国, 等. 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, 2006,13(4):136–147.
- [48]Li C, Zheng A. Paleozoic stratigraphy in the Qiangtang region of Tibet: relations of the Gondwana and Yangtze continents and ocean closure near the end of the Carboniferous[J]. International Geology Review, 1993, 35(9): 797–804.
- [49]李才, 翟刚毅, 王立全, 等. 认识青藏高原的重要窗口——羌塘地区近年来研究进展评述(代序) [J]. 地质通报, 2009, 28(9): 1169–1177.
- [50]彭虎, 李才, 解超明, 等. 藏北羌塘中部日湾茶卡组物源——LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄及稀土元素特征[J]. 地质通报, 2014, 23 (11):1715–1727.
- [51]Zhang X Z, Dong Y S, Wang Q, et al. Metamorphic records for subduction erosion and subsequent underplating processes revealed by garnet–staurolite–muscovite schists in central qiangtang, Tibet[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2017, 18:266–279.
- [52]Cawood P A, Hawkesworth C J, Dhuime B. Detrital zircon record and tectonic setting[J]. Geology, 2012, 40(10):875–878.
- [53]Xu W, Dong Y, Zhang X, et al. Petrogenesis of high–timafic dykes from southern qiangtang, tibet: implications for a ca. 290Ma large igneous province related to the early permian rifting of gondwana[J]. Gondwana Research, 2016, 36: 410–422.
- [54]Zhai Q G, Jahn B M, Su L, et al. SHRIMP zircon U–Pb geochronology, geochemistry and Sr–Nd–Hf isotopic compositions of a mafic dyke swarm in the Qiangtang terrane, northern Tibet and

- geodynamic implications[J]. *Lithos*, 2013, 174: 28–43.
- [55] Hening A. *Eur Petrographic and Geologie Von Sudwest Tibet*[C]// Hedin S. *Southern Tibet*. Stockholm:Noratet, 1915, 5: 220.
- [56] 李才. 西藏羌塘中部蓝片岩青铝闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar定年及其地质意义[J]. *科学通报*, 1997, 42: 448.
- [57] Tang X C, Zhang K J. Lawsonite- and glaucophane-bearing blueschists from NW Qiangtang, northern Tibet, China: mineralogy, geochemistry, geochronology, and tectonic implications[J]. *International Geology Review*, 2014, 56(2): 150–166.
- [58] Zhai Q G, Jahn B M, Li X H, et al. Zircon U–Pb dating of eclogite from the Qiangtang terrane, north-central Tibet: a case of metamorphic zircon with magmatic geochemical features[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2016, 106: 1–17.
- [59] Pullen A, Kapp P, Cehrels G E, et al. Triassic continental subduction in central Tibet and Mediterranean-style closure of the Paleotethys Ocean[J]. *Geology*, 2008, 36:351–354.
- [60] Hermann J, Rubatto D, Korsakov A, et al. Multiple zircon growth during fast exhumation of diamondiferous, deeply subducted continental crust (Kokchetav massif, Kazakhstan) [J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 2001, 141(1): 66–82.
- [61] Liu F L, Xu Z Q, Xue H M. Tracing the protolith, UHP metamorphism, and exhumation ages of orthogneiss from the SW Sulu terrane (eastern China): SHRIMP U–Pb dating of mineral inclusion-bearing zircons[J]. *Lithos*, 2004,78(4):411–429.
- [62] Dan W, Wang Q, White W M, et al. Rapid formation of eclogites during a nearly closed ocean: revisiting the Pianshishan eclogite in Qiangtang, central Tibetan Plateau[J]. *Chemical Geology*, 2018, 477: 112–122.
- [63] Valley J W, Kinny P D, Schulze D J, et al. Zircon megacrysts from kimberlite: oxygen isotope variability among mantle melts[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1998,133: 1–11.
- [64] Schmidt M W, Poli S. *Devolatilization during subduction*[C]// *Treatise on geochemistry (Second Edition)*, 2013:669–701.
- [65] 苑婷媛, 赵中宝, 曾庆高, 等. 藏西北戈木日榴辉岩岩石学特征及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2016, 32(12): 3729–3742.
- [66] Cherniak D J. Pb diffusion in rutile[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2000, 139: 198–207.
- [67] Kooijman E, Mezger K, Berndt J. Constraints on the U–Pb systematics of metamorphic rutile from in situ LA–ICPMS analysis[J]. *Earth and Planet Science Letters*, 2010, 293: 321–330.
- [68] 程昊, 曹达迪. 石榴石 Lu–Hf 年代学及其在大别造山带研究中的进展[J]. *科学通报*, 2013, 58(23) : 2271–2278.
- [69] 翟庆国. 藏北羌塘中部榴辉岩岩石学、地球化学特征及构造演化过程[D]. 中国地质科学院博士学位论文, 2018.
- [70] Zack T, Moraes R, Kronz A. Temperature dependence of Zr in rutile: empirical calibration of a rutile thermometer[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2004, 148: 471–488.
- [71] Watson E B, Wark D A, Thomas J B. Crystallization thermometers for zircon and rutile[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2006, 151: 413–433.
- [72] Tomkins H S, Powell R, Ellis D J. The pressure dependence of the zirconium-in-rutile thermometer[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2007, 25: 703–713.
- [73] Fialin M, Remy H, Richard C, et al. Trace element analysis with the electron microprobe: new data and perspectives[J]. *American Mineralogist*, 1999, 84: 70–77.
- [74] 王汝成, 王硕, 邱检生, 等. CCSD主孔揭示的东海超高压榴辉岩中的金红石:微量元素地球化学及其成矿意义[J]. *岩石学报*, 2005, 21(2): 465–474.
- [75] Gao X Y, Zheng Y F, Xia X P, et al. U–Pb ages and trace elements of metamorphic rutile from ultrahigh-pressure quartzite in the Sulu orogeny[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 143: 87–114.
- [76] Zheng Y F, Gao X Y, Chen R X, et al. Zr-in-rutile thermometry of eclogite in the Dabie orogen: Constraints on rutile growth during continental subduction-zone metamorphism[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40: 427–451.
- [77] Cawood P A, Buchan C. Linking accretionary orogenesis with supercontinent assembly[J]. *Earth–Science Reviews*, 2007, 82: 217–256.
- [78] Cawood P A, Johnson M R W, Nemchin A A. Early Palaeozoic orogenesis along the Indian margin of Gondwana: tectonic response to Gondwana assembly[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 255: 70–84.
- [79] Herwartz D, Nagel T J, Münker C, et al. Tracing two orogenic cycles in one eclogite sample by Lu–Hf garnet chronometry[J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4: 178–183.
- [80] Root D, Corfu F. U–Pb geochronology of two discrete Ordovician high-pressure metamorphic events in the Seve Nappe Complex, Scandinavian Caledonides[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2012, 163: 769–788.
- [81] Kirchenbaur M, Pleuger J, Jahn–Awe S, et al. Timing of high-pressure metamorphic events in the Bulgarian Rhodopes from Lu–Hf garnet geochronology[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2012, 163: 897–921.
- [82] Agard P, Yamato P, Jolivet L, et al. Exhumation of oceanic blueschists and eclogites in subduction zones: timing and mechanisms[J]. *Earth–Science Reviews*, 2009, 92(1): 53–79.
- [83] Kapp P, Murphy M A, Yin A, et al. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Shiquanhe area of western Tibet[J]. *Tectonics*, 2003, 22: 3–23.
- [84] Fan J J, Li C, Xie C M, et al. Petrology and U–Pb zircon geochronology of bimodal volcanic rocks from the Maierze Group, northern Tibet: Constraints on the timing of closure of the Banggong–Nujiang Ocean[J]. *Lithos*, 2015, 227: 148–160.
- [85] Zhang X Z, Wang Q, Dong Y S, et al. High-pressure granulite facies overprinting during the exhumation of eclogites in the Bangong–Nujiang suture zone, central Tibet: Link to flat-slab subduction[J]. *Tectonics*, 2017, 36: 2918–2935.
- [86] 赵靖, 钟大赉, 王毅. 滇西澜沧变质带的变质作用和变形的关系[J]. *岩石学报*, 1994, 10(1):27–40.