科学通报 2009 年 第 54 卷 第 13 期: 1804 ~ 1814
专题: 大陆碰撞与洋壳俯冲 评 述 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

青藏高原腹地榴辉岩研究进展及其地球动力学意义

张开均[①②], 唐显春[②③]

① 南京大学地球科学系, 南京 210093;
② 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640;
③ 中国科学院研究生院, 北京 100049
E-mail: kjzhang@nju.edu.cn; kaijun@gig.ac.cn

2009-03-16 收稿, 2009-05-11 接受
中国科学院"百人计划"资助项目

摘要 近年来在青藏高原腹地的中羌塘构造带、班公湖-怒江构造带的八宿变质杂岩及拉萨地体内部的松多和蓬湖等多处, 发现了榴辉岩, 在八宿和蓬湖榴辉岩中还甄别出辉石中出溶石榴石条带等多种典型的超高压变质现象. 这些榴辉岩所记录的超高压变质作用均发生于早中生代. 伴随这些超高压变质岩的折返, 在中羌塘带、班-怒带东部和拉萨地体东部都发生了广泛的(后)碰撞型岩浆活动. 这些早中生代榴辉岩的厘定揭示特提斯演化的无序性, 它们本身可能是西羌塘-拉萨复合陆块不规则大陆边缘与东羌塘陆块, 沿着连接的班-怒带东部至羌塘中部构造带穿时碰撞拼贴的结果, 相关岩浆岩则是岩石圈加厚熔融和拆沉的产物. 中羌塘和八宿榴辉岩都是大陆俯冲的产物, 它们的折返和剥蚀分别为松潘-甘孜三叠纪复理石沉积和班-怒带西部侏罗纪复理石沉积提供了重要的物源. 青藏高原榴辉岩研究尚属起步阶段, 亟需在岩石分布、典型岩石-矿物序列及其形成的温、压条件、形成和折返的时限和机制、原岩特征及构造背景、与特提斯演化和大型盆地关系上, 深入进行研究.

关键词
青藏高原
超高压变质
岩石圈深俯冲
榴辉岩
特提斯
板块构造

近 20 年来有关超高压变质岩和岩石圈深俯冲作用的许多重大发现, 有力地推动了大陆动力学研究, 为全面准确理解岩石圈板块构造演化提供了重要途径[1,2]. 榴辉岩(含榴辉岩相岩石, 下同)是(超)高压变质岩的主要岩石类型, 很多超高压变质现象都存在于榴辉岩中, 因此发现和研究榴辉岩成为甄别(超)高压变质岩和认识岩石圈深俯冲作用的关键环节. 青藏高原主体是多个大陆岩石圈地体在中生代碰撞拼贴的产物[3~9], 然而, 对这一复杂漫长的过程, 迄今为止知之甚少, 并存在许多重大争议. 近年来, 我国学者在青藏高原腹地多个构造带发现了榴辉岩露头(图 1)[10~15], 为阐明青藏高原地质历史时期不同板块岩石圈碰撞过程和行为、为深入理解特提斯演化提供了关键性材料, 并为进一步研究(超)高压变质岩和岩石圈深俯冲作用提供了又一理想位置. 本文综述青藏高原榴辉岩研究进展, 并探讨其地球动力学意义.

1 主要榴辉岩岩石单元

1.1 羌塘中部榴辉岩

西藏羌塘地体中部长逾 1000 km 的变质岩带, 是青藏高原上一个突出的构造单元(图 1). 自 Hennig[37]首次报道在该地区发现蓝片岩以来[38], 一直为国内外地球科学界所瞩目[3~9], 但由于工作条件十分艰苦, 在本世纪以前研究进展不大, 对这一构造带的性质和演化仍然存在极大的争议[9~11,16,20,39~43]. 目前, 至少在中羌塘变质带藕山和双湖两处发现了榴辉岩(图 1). 在藕山附近发现的榴辉岩[10,11](图 1 中 E1)出露面积至少达 200 m × 800 m, 榴辉岩(图 2(b))与榴辉岩相长英质片岩、片麻岩及少量大理岩互层出

引用格式: 张开均, 唐显春. 0B 青藏高原腹地榴辉岩研究进展及其地球动力学意义. 科学通报, 2009, 54: 1804~1814
Zhang K J, Tang X C. Eclogites in the interior of the Tibetan Plateau and their geodynamic implications. Chinese Sci Bull, 2009, 54: 2556－2567, doi: 10.1007/ s11434-009-0407-9

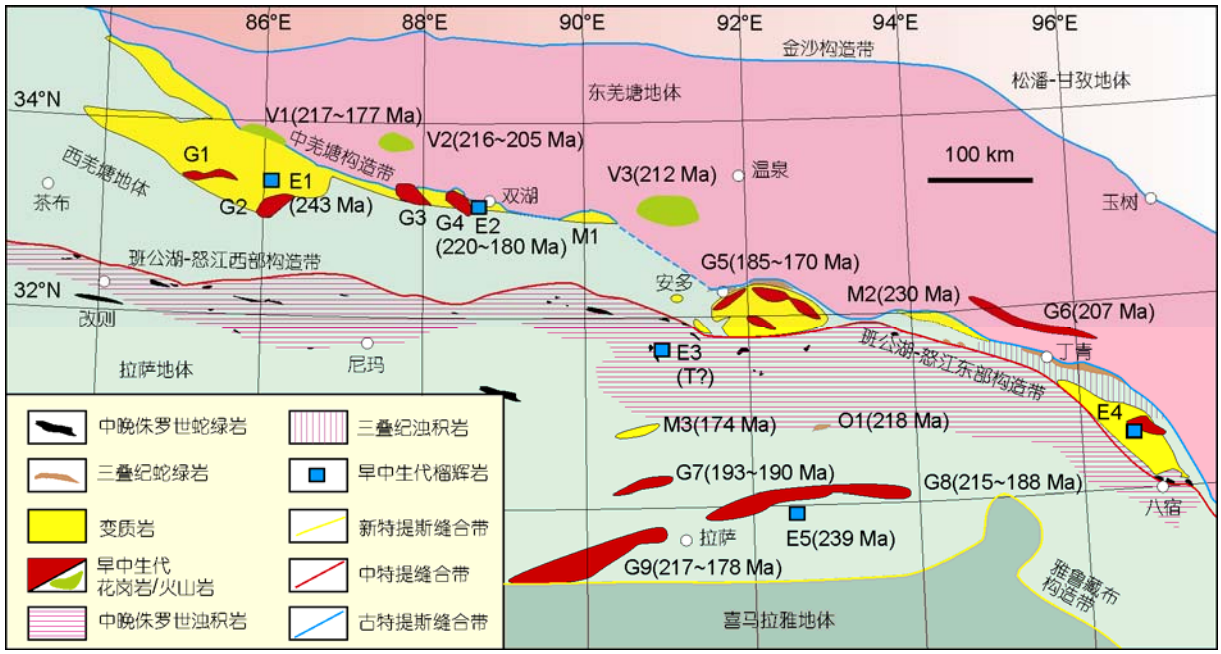


图 1　青藏高原主体构造单元及榴辉岩露头分布

数据来源：榴辉岩E1，文献[10, 11, 16]; E2，本文; E3，文献[15]; E4，文献[14]; E5，文献[12, 13, 17]. 花岗岩 G1，文献[18]; G2，文献[19]; G3，文献[20]; G4，文献[21]; G5，文献[22]; G6，文献[23]; G7，文献[24]; G8，文献[25~27]; G9，文献[28，29]. 变质岩M1，文献[30]; M2，文献[31]; M3，文献[32]. 蛇绿岩O1，文献[33]. 火山岩 V1，文献[34]; V2，文献[35]; V3，文献[36]

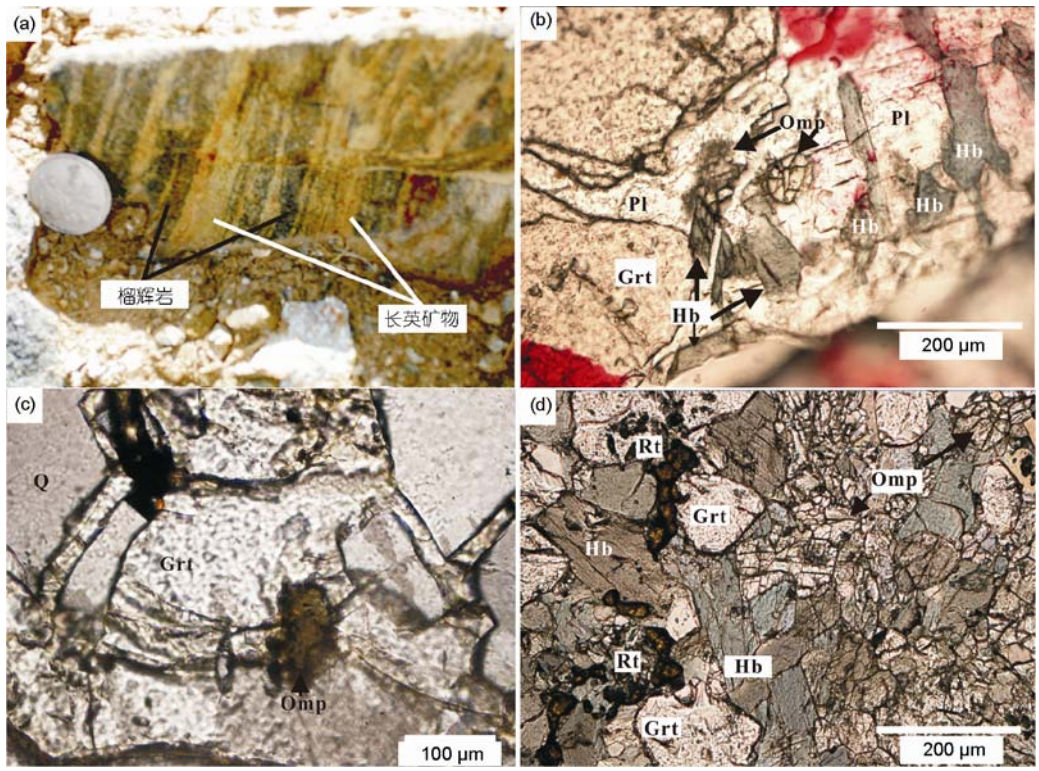


图 2　中羌塘变质带中的榴辉岩

(a)~(c) 藕山榴辉岩(图 1 中E1), (a) 野外露头照片, (b) 榴辉岩[10], (c) 长英质榴辉岩相片岩中的石榴石及其绿辉石包体; (d) 阿木岗榴辉岩(图 1 中E2). (b)~(d) 为单偏光显微照片. Grt，石榴石; Hb，角闪石; Omp，绿辉石; Pl，斜长石; Rt，金红石

现(图 2(a)). 榴辉岩中绿辉石含硬玉分子(jd)变化于40%~62%, 石榴子石中镁铝榴石(pyrope)端元组分3% ± 1%, 铁铝榴石(alm)58% ± 6%, 钙铝榴石(gross)29% ± 6%. 榴辉岩含丰富的金红石和多硅白云母. 后者含Si高达 3.39[10]. 利用grt-omp-phe和grt-omp矿物组合等经典变质温压计[44,45]初步估算, 榴辉岩样品的变质*P*, *T*分别为 2~2.5 GPa和 482~625℃. 绿辉石中发现的石英针析出物[10], 与这一推断相吻合. 榴辉岩遭受了强烈的角闪岩化退变质作用(*T* = 460~ 600℃, *P* = 10~12 kbar (1 bar = 10^5 Pa, 下同))[10]. Pullen等人[16] 采用Lu-Hf同位素定年法, 对榴辉岩中石榴石和绿辉石进行了测定, 推断其形成年龄约243 Ma.

藕山榴辉岩带中的长英质片岩、片麻岩含有丰富的石榴石颗粒, 石榴石中镁铝榴石、铁铝榴石和钙铝榴石端元组分分别为 10%~12%, 53%~57%, 31%~34%, 但普遍交代强烈, 部分石榴石中含绿辉石及金红石包体(图 2(c)). 推断长英质榴辉岩相岩石经历了与榴辉岩相似的 *P*-*T*-*t* 演变途径.

最近在双湖附近也发现了榴辉岩(图 1 中 E2). 这个榴辉岩发现于阿木岗雪山下的一个巨大的滚石中(直径> 2 m), 因此对其产状和出露面积尚不清楚. 双湖榴辉岩与藕山榴辉岩组分相似, 但其中缺少多硅白云母(图 2(d)). 其石榴石和绿辉石的成分与藕山的相近, 因此, 它所承受的温压条件与藕山榴辉岩是相近的.

1.2 班公湖-怒江构造带东部八宿榴辉岩[14]

横亘于青藏高原中部的班公湖-怒江缝合带分割了拉萨板块和羌塘板块(图 1), 是特提斯域的一个重要的构造单元. 榴辉岩分布于班公湖-怒江构造带东部八宿高级变质杂岩地体内, 位于八宿县城 NW 约100 km处(图 1 中 E4), 榴辉岩呈透镜体产出于斜长片麻岩和花岗片麻岩中, 长轴方向与围岩片理或片麻理一致, 呈 NW-SE 展布, 规模可达~50 m 长, ~10 m 宽. 八宿榴辉岩呈块状和条带状构造, 中粒花岗变晶结构, 峰期变质矿物组合为: 石榴石 + 单斜辉石 + 斜方辉石 + 金红石 + 透长石, 为典型的榴辉岩相矿物组合. 在八宿榴辉岩的超高压矿物组合中发现斜方辉石、石榴石及透长石在早期单斜辉石中成条带状、针状出溶的超高压变质现象(图 3(b)~(d)); 而没有出溶结构的单斜辉石含有较高含量的 K_2O(0.22%~

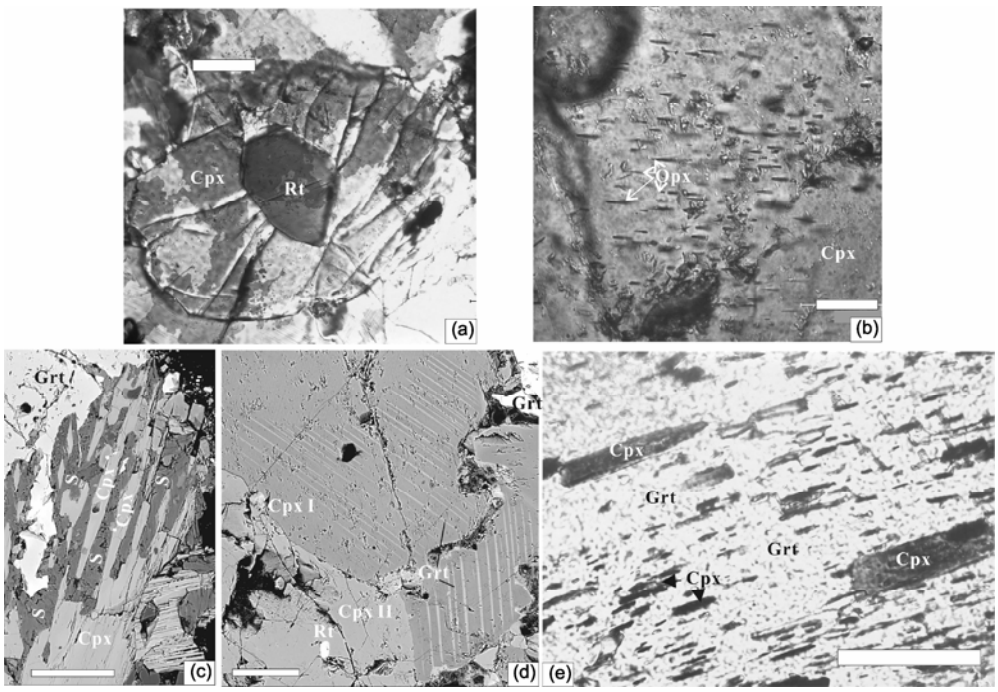


图 3 班公湖-怒江构造带东部八宿变质带中的榴辉岩

采样位置见图 1 中E4. (a) 单斜辉石中的金红石包体, 具稀疏放射状裂纹; (b) 单斜辉石中出溶斜方辉石; (c) 单斜辉石中出溶透长石; (d) 单斜辉石中出溶石榴石; (e) 石榴石中出溶单斜辉石. (a), (b), (e) 为单偏光显微照片; (c), (d) 为背散射(BSE)照片; 比例尺长度为 100 μm, (a)~(d)据文献[14]. Cpx, 单斜辉石; Opx, 斜方辉石; S, 透长石; 其余缩写同图 2

0.45%)和TiO_2(0.3%~0.6%). 辉石中较高含量的K_2O(平均可达0.2%), 可能为超高压条件下半径较大的原子K替代原子半径较小的Na原子的结果[46~48]. 个别金红石作为包体存在于辉石中, 其周边具有稀疏的放射状裂纹(图 3(a)), 这指示可能存在一种TiO_2同质异相类矿物(具有α-PbO_2结构的TiO_2多型)的释压过程[49~51]. 根据经典的温度压力计[52]估算其峰期变质温压条件为 930~1050℃, 3.5~4.5 GPa, 按照岩石静压力估算其俯冲深度可达 130 km. 后期角闪岩相退变质阶段其变质温压条件也达 520~620℃, 1~1.4 GPa. 最近, 我们在八宿榴辉岩的石榴石中发现了单斜辉石的出溶(图 2(e)). 按照现有的实验数据估计, 出现这种出溶的压力可能更高[53].

依据前人基础地质研究工作得出的地层年代学数据[54]及个别同位素年龄[22,32], 八宿变质地体向羌塘地体的大陆深俯冲可能发生在早侏罗世(195 Ma), 折返在中侏罗世(185~170 Ma).

1.3 拉萨地体内的榴辉岩

(ⅰ) 蓬湖榴辉岩[15]. 在拉萨地体北部湖区蓬湖西部发现了丰富的榴辉岩相岩石(图 1 中E3), 分布面积约 3 km^2, 已甄别的榴辉岩相岩石包括石榴石辉橄岩、石榴石橄榄岩和榴辉岩等(图 4), 系蛇绿岩超高压变质作用后的产物. 榴辉岩相变质矿物主要包括: 单斜辉石、斜方辉石、石榴石、橄榄石和尖晶石等. 蓬湖蛇绿岩质榴辉岩相岩石中出溶结构十分发育, 出溶相包括 3 期石榴石、单斜辉石、斜方辉石、铝铬铁矿和钠长石等(图 4), 其中以单斜辉石出溶石榴石+斜方辉石和石榴石出溶单斜辉石为主. 榴辉岩中的主晶单斜辉石为透辉石(SiO_2 = 51.31%~53.87%, TiO_2 = 0.16%~0.92%, Al_2O_3 = 1.76%~2.73%, FeO_{total} = 3.28%~4.28%, MgO = 15.73%~17.77%, MnO = 0.07%~0.22%, CaO = 22.51%~24.24%, Na_2O = 0.25%~0.47%, K_2O < 0.03%), 出溶的单斜辉石为透辉石和普通辉石, 与主晶单斜辉石成分相近; 出溶斜方辉石为顽火辉石; 出溶石榴石的端元组成变化不大, 均为镁铝榴石分子接近 100%的石榴石. 铝铬铁矿为尖晶石族, 主要包含 FeO_{total}, Cr_2O_3, Al_2O_3 和 MgO, 平均含量分别为 30.50%, 36.91%, 21.51%和 7.27%.

P-T 路径研究表明, 蓬湖蛇绿岩质榴辉岩相岩石曾经俯冲到地表以下 150 km(5 GPa)的深部地幔. 广泛的地球化学分析显示, 蓬湖蛇绿岩质榴辉岩相岩石稀土元素含量很低(球粒陨石标准化值<1), 配分样式平坦, 因此这种蛇绿岩质榴辉岩原岩可能形成于大洋中脊(MOR)环境, 但 Nb 和 Ta 有轻微的亏损, 有可能局部受到地壳物质污染.

(ⅱ) 松多榴辉岩[12,13,17]. 松多榴辉岩位于拉萨地体中部拉萨市NEE约 135 km松多村附近(图 1 中E5). 观察到的榴辉岩带宽度约 500~600 m, 呈近东西向延伸, 已知规模 10 km以上. 厚层状、块状榴辉岩呈构造岩片产在含石榴石云母石英片岩中. 常见的榴辉岩为金红石榴辉岩、石英榴辉岩和多硅白云母榴辉岩. 榴辉岩相矿物为石榴石+绿辉石+金红石+ 多硅白云母+(石英). 榴辉岩的绿辉石含硬玉分子变化于 16%~44%; 石榴石中镁铝榴石(pyrope)端元组分 16%~33%, 铁铝榴石(alm)40%~54%, 钙铝榴石(gross)22%~31%. 利用Grt-Omp-Phe和Grt-Omp矿物组合[44,45]对变质温-压初步估算, 榴辉岩的形成温度和压力条件分别为*T* = 730℃, *P* = 2.7 GPa, 接近

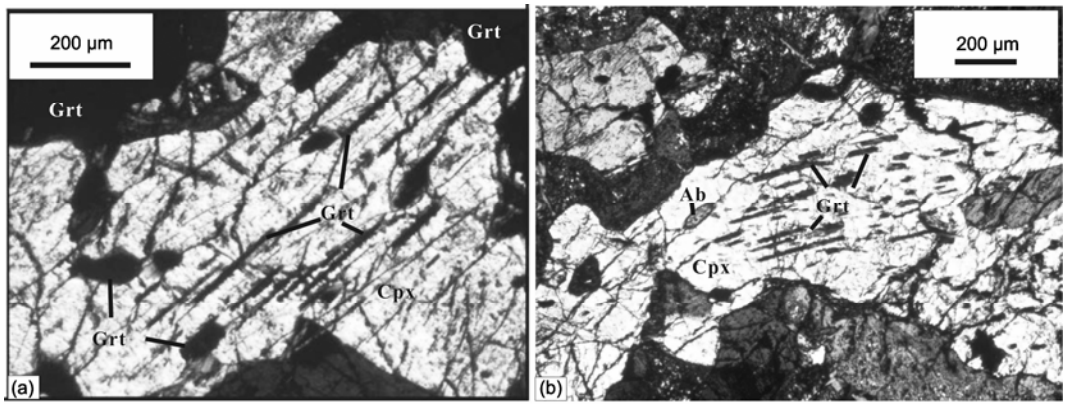


图 4 拉萨地体北部蓬湖榴辉岩相岩石[15]

采样位置见图 1 中 E3. 正交偏光, 其中的单斜辉石具有丰富的出溶现象. Ab, 钠长石; 其余缩写同图 2

于石英→柯石英的转变线[12,13].

岩石地球化学和Sr-Nd同位素数据均指示榴辉岩原岩为典型的MOR玄武岩，来自亏损地幔，表明其应为大洋地壳深俯冲的产物[12,13,17]. 榴辉岩SHRIMP锆石U-Pb定年为 263 Ma[13]. 不过，榴辉岩的全岩、石榴石和辉石的Sm-Nd同位素等时线年龄为(239 ± 3)Ma[17]. 榴辉岩以及含石榴子石云母石英片岩等变质岩与周围晚古生代沉积地层呈截然的、不协调的接触关系，显示其可能为异地推覆体，推覆折返时间约在 230~220 Ma[55].

2 地球动力学意义

2.1 特提斯地体演化的无序性

近 30 年来国内外对青藏高原地质历史研究的一个定论是，它是一系列由冈瓦纳超级大陆北缘裂开的地体，在特提斯洋中不断向北漂移，在中生代依次向欧亚大陆南缘拼贴碰撞而成的，即这种拼贴是相当有序进行的[3~9]. 然而，榴辉岩研究的最新结果表明，以中羌塘榴辉岩形成为标志的东、西羌塘大陆碰撞(243 Ma)[16]，远早于其北侧的松潘-甘孜洋盆的封闭，后者发生于晚三叠末期-侏罗纪早期[5]. 在羌塘大陆南侧，班公湖-怒江中特提斯洋远至侏罗纪末期到白垩纪最早期才完全封闭[56]. 这些事实表明，在地质历史时期，构成青藏高原的特提斯地体的拼贴和特提斯分支的消亡可能是相当无序的[13,57].

2.2 羌塘中部超高压变质带的构造属性和演化

近 20 年来，对羌塘中部变质带的构造属性和演化的研究形成了两个主要的模式. 一种认为，它代表东、西羌塘地体的缝合带，是大洋俯冲形成的混杂堆积[11]；另一种认为羌塘中部变质带是由于洋壳沿金沙江缝合带向南俯冲，洋壳上携带的可可西里复理石通过底劈作用，在羌塘中部产生的大片变质核杂岩型蓝片岩和混杂堆积[9,20,39]. “缝合带”说认为羌塘地壳属于正常型地壳，中羌塘构造演化对后期高原形成意义不大；而“底劈”说认为羌塘地体大半部在 10 km以下都是洋壳和其上的沉积物，由于这些沉积物在下地壳产生韧性流导致地壳隆升，因而制约了高原的隆起[20,39,58,59].

羌塘中部超高压变质带中的变沉积岩的原岩基本是一套被动大陆边缘成熟的砂-泥岩组合，石英含量高，这是与地球化学[42]和Nd同位素[43]研究结果高度一致的. 对蓝片岩和榴辉岩中锆石SHRIMP U-Pb同位素定年初步结果表明，其中含大量的古生代和前寒武纪锆石(文献[60]以及我们未发表的数据)，揭示其原岩应为大陆玄武岩质岩石. 榴辉岩中的石榴石和单斜辉石中低的镁含量也指示它不是地幔起源的[10]. 已有的蓝片岩和榴辉岩的地球化学数据显示这些基性变质岩均具有高TiO_2含量(>2%)、轻稀土高度富集、Nb和Ta无亏损的特点，显示其原岩均为大陆玄武岩，与峨眉玄武岩高度相似[42]. 显然，羌塘中部高压变质杂岩总体上代表一个深俯冲的被动大陆边缘[10,42,43]，主要由前寒武基底、古生代地台相浅海沉积物组成，其中包含少量玄武质火山岩夹层. 加上榴辉岩形成的时代(243 Ma)[16] 远早于松潘-甘孜三叠纪复理石的沉积时间(220~203 Ma)[5]，因此，Kapp 等人[20,39]提出的羌塘中部超高压变质带源自金沙江缝合带的可能性不大，这个超高压构造带应代表东西羌塘地体间的“原生的”构造界线(缝合带)，是大陆碰撞和俯冲的产物(图 5(a))[10,41,42].

由于羌塘中部超高压变质带的折返时间(222~204 Ma)[20,39]、折返和剥蚀的体积(2.5×10^6 km^3)[10]与松潘-甘孜三叠纪复理石的沉积时间(230~203 Ma)、体积(2×10^6 km^3)[5]相当，特别是前者要比大别山超高压变质带更邻近松潘-甘孜盆地，该超高压变质岩的折返和剥蚀可能是松潘-甘孜三叠纪复理石的主要物源区之一(图 5(b))[10,57,61]. 最近对整个松潘-甘孜三叠纪复理石盆地所做的古流向测量、砂岩组分、人工重矿物[57]和泥质岩石地球化学和Nd同位素分析[61]等系统研究，证实了这一论断. 值得一提的是，在盆地西部发现该复理石砂岩的碎屑组分以变质岩为主，基本没有磨圆，古流向为由西往东，同时也发现了大量超高压矿物碎屑，如C型石榴子石、绿辉石、硅金红石、金红石和绿帘石等[57]，而这些特征矿物在东部地区尚未发现，因此，至少松潘-甘孜盆地西部的复理石物源来自中羌塘是无疑的. 西部复理石中的泥质岩具有很低的化学风化指数(CIA = 58)，指示寒冷的源区，表明当时羌塘中部可能隆起到足以产生局部冰川性气候的高度[61].

2.3 班-怒带东部至羌塘中部超高压构造带的连接：青藏高原早中生代构造运动新设想

青藏高原腹地广泛发育的榴辉岩无疑为我们带来丰富的地球动力学信息，但同时也给青藏高原构造演化的研究提出了许多重要的问题. 问题之一是，在拉萨地体内部发现的蓬湖和松多大洋型榴辉岩代

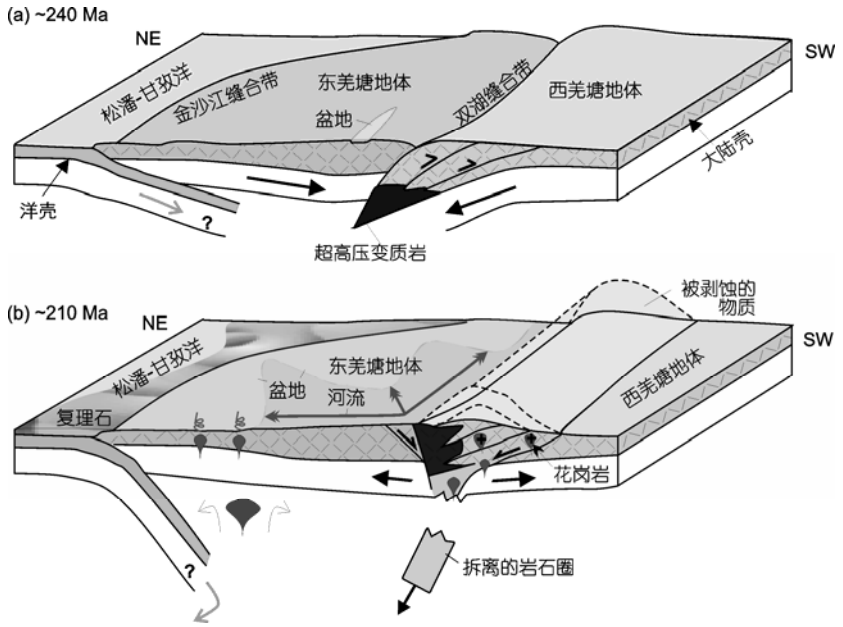


图 5　中羌塘含榴辉岩超高压构造带演化示意图[10]

(a) 西羌塘地体沿双湖缝合带向东羌塘地体俯冲，产生超高压榴辉岩带; (b) 由于拆沉作用，超高压榴辉岩带折返，并被大量剥蚀为松潘-甘孜洋复理石沉积提供物源

表了两个不同的缝合带吗？在这两处榴辉岩间还有一处三叠纪洋中脊型蛇绿岩露头(图 1 中O1)[33]、多处侏罗纪蛇绿岩露头(图 1)[30,62]. 假如它们都代表独立的缝合带，拉萨地体内有那么多缝合带吗?

Ernst[2]通过对全球超高压带综合研究发现，超高压岩的形成和折返时间相隔不超过 15 Ma. 基于这一认识并综合考虑地质构造背景和前人研究成果[3~9]以及比较可靠的 230~220 Ma折返推覆年龄[55]，我们取松多榴辉岩的形成年龄为 239 Ma[17]. 那么，羌塘中部榴辉岩与松多榴辉岩的形成具有同时性(约 240 Ma). 尽管蓬湖榴辉岩还缺少年龄数据[15]，它也有可能与这两处榴辉岩的形成是同时的(图 6). 在中羌塘构造带[18,19,21,34~36,65]和拉萨地体东部[24~29]，都发现了时代相似的(217~174 Ma)(后)碰撞型强过铝花岗岩及中酸性火山岩，其中还有一些是埃达克质. 在安多变质地体中，也发现了大量 185~170 Ma的A型花岗岩(图 6)[22]. 拉萨地体东部的岩浆活动似乎不太可能是雅鲁藏布特提斯洋壳俯冲产生的，因为几乎所有的现有证据均表明此时雅鲁藏布洋壳刚开始拉张[3~9]. 这些岩浆活动时限与榴辉岩的折返时间大部分重叠(图 6). 显然，它们应是大陆俯冲/地壳加厚熔融及岩石圈拆沉作用的产物. 拉萨地体东部地壳在早中生代明显增厚的证据除了强过铝花岗岩和埃达克岩外，

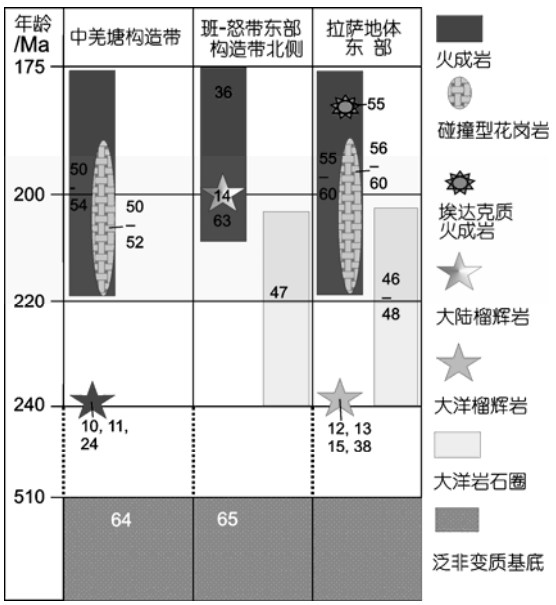


图 6　青藏高原腹地早中生代(超)高压作用-岩浆活动总结

除年龄外，图中其余数字均为参考文献代码

Hu等人[32]曾报道前寒武纪念青唐古拉山群变质岩中出现(较)高压辉石石榴角闪岩，它的峰期变质压力 8.6~10 kbar，温度 769~905℃，即它可能曾深埋于至少 33 km 的深处(假定地壳平均密度 = 2.67 g·cm^{-3})，它的折返发生在 174 Ma；江万等[66]指出，该地区的

白垩纪火山岩中普遍有多硅白云母包体(Si≥3.4), 这些多硅白云母的形成压力也远大于 8 kbar, 甚至可能高达 25 kbar; 它们显然是基底加厚的证据. 中羌塘构造带和拉萨地体东部这两个彼此相近的构造单元的超高压变质作用与岩浆作用的时限和构造-热事件属性如此吻合, 是巧合还是有成因上的联系?

以安多为界, 班公湖-怒江缝合带东、西两侧具有截然不同的地质特征(图 1)[30]. 西侧主要充填有侏罗纪复理石及侏罗纪蛇绿岩碎片. 而东侧包含有安多和八宿两个变质地体, 变质地体北侧主要充填有三叠纪复理石、三叠纪蛇绿岩碎片, 并有三叠纪长英质岩浆活动[23,31]和构造变形[31](图 6), 而其南侧则主要有侏罗纪复理石及侏罗纪蛇绿岩碎片(图 1). 班-怒构造带为何在早中生代出现明显的东西分化, 也是青藏高原地质中的一个重要问题[14,56]. 就中羌塘变质带而言, 它最东边的露头在双湖附近或略东(图 1), 尽管近十多年做了许多细致的地质填图, 然而, 它如何往东南方向延伸, 仍然是一个悬而未决的重大问题.

我们尝试建立一个青藏高原腹地统一的早中生代构造模式来解决上述问题(图 7). 我们设想在早中生代, 中羌塘变质带与班-怒带东部变质地体是相互连接的, 即曾包含这两个构造单元的西羌塘和拉萨地体, 在早中生代及之前曾连接在一起, 形成一个统一的地体(图 7(a)~(d)). 在这个地体上, 西羌塘可能作为一个大陆凸岬存在, 它们由一个古特提斯分支(双湖-丁青古特提斯洋)与东羌塘地体分割(图 7(a), (f), (g)). 中羌塘与班-怒带东部相似的泛非基底(图 6)[63,64], 也许暗示这个地体包含有此类基底(图 7). 这两个构造单元的连接部分有可能被晚中生代沉积覆盖了, 这个部分的北侧有三叠纪的岛弧岩浆活动(图 1 中V3)[30,36].

在 240 Ma左右, 西羌塘陆岬首先向东羌塘地体碰撞/俯冲, 并产生大陆型榴辉岩; 此时东边的海湾尚未封闭, 不过该处洋壳的俯冲也产生了大洋型榴辉岩(图 7(b), (h), (i)). 至 220 Ma, 西边的大陆榴辉岩开始往地表逆冲折返, 中羌塘变质带出现雏形; 东边的大洋型榴辉岩及洋壳仰冲至拉萨地体东部; 此时, 东部海湾的洋壳仍在向下俯冲. 此后, 由于岩石圈加厚熔融及拆沉作用, 导致广泛的过铝花岗岩侵入及中酸性(含埃达克质)岩浆活动以及伸展变形, 中羌塘变质带广泛剥蚀并供给松潘-甘孜洋盆沉积(图 7(c), (j), (k)). 至 200 Ma, 班-怒带东部的海湾洋壳消耗完毕, 拉萨地体的俯冲形成八宿榴辉岩, 班-怒带北边的三叠纪缝合带出现. 在这期间, 岩石圈拆沉、伸展变形和岩浆活动仍在不断发生, 致八宿榴辉岩折返(图 7(d), (l), (m)); 由于新特提斯洋可能开始俯冲, 沿班-怒构造带南侧发生强烈右旋走滑拉伸[67,68], 导致真正意义上的班公湖-怒江中特提斯在 180 Ma 开始出现, 并使得西羌塘与拉萨地体分离(图 7(e), (n), (o)).

班-怒构造带西部侏罗纪复理石也是一个规模巨大的沉积体(厚度达 15 km, 最大出露宽度近 100 km, 出露长度达 1000 km)[30], 主要沉积时间为中晚侏罗世[30,67]到白垩纪最早期[56]. 八宿榴辉岩折返时间、折返和剥蚀的体积与这个复理石体的沉积时间和体积相当, 因此该超高压变质岩的折返和剥蚀可能是班公湖-怒江缝合带西段侏罗纪复理石的主要源区之一[14].

3 研究展望

对于青藏高原榴辉岩的研究刚刚起步, 许多重大的、关键的问题仍有待解决, 亟需在以下几个方面进行深入工作.

(1) 各个榴辉岩带的分布状况、典型变质岩类和矿物组合、峰期变质及退变质的温度、压力条件. 在中羌塘变质带, 前人早就报道过蓝晶石 + 石榴石 + 辉石变质组合[30], 我们也在松潘-甘孜三叠纪复理石砂岩中找到了硅金红石[57], 后者仅在含金刚石的超高压岩石中出现过[69]. 因此, 在这个变质带应能找到具有更高成岩温度-压力的变质组合. 在西藏湖区的第四纪沉积物中多次找到过金刚石碎屑颗粒, 矿物化学研究表明它们不太可能来自金伯利岩等幔源岩石[70], 因此有望在八宿超高压变质带或/和蓬湖榴辉岩中找到典型的超高压矿物金刚石. 与八宿超高压变质带具有相似构造性质的安多变质杂岩体也是特提斯构造演化中残留的微陆块[22,64], 有可能也经历过与前者类似的超高压变质作用. 在青藏高原的其他构造带如金沙江构造带、甘孜-理塘构造带等也有可能发现新的榴辉岩露头.

(2) 榴辉岩超高压变质作用的形成和折返时间、机制; 超高压变质岩的原岩、其成岩时间、构造背景. 超高压变质岩代表俯冲了的大陆岩石圈或大洋岩石圈的残余, 是了解这些或许已经消失了的岩石圈的窗口. 这些方面的研究对于重塑特提斯演化与青藏

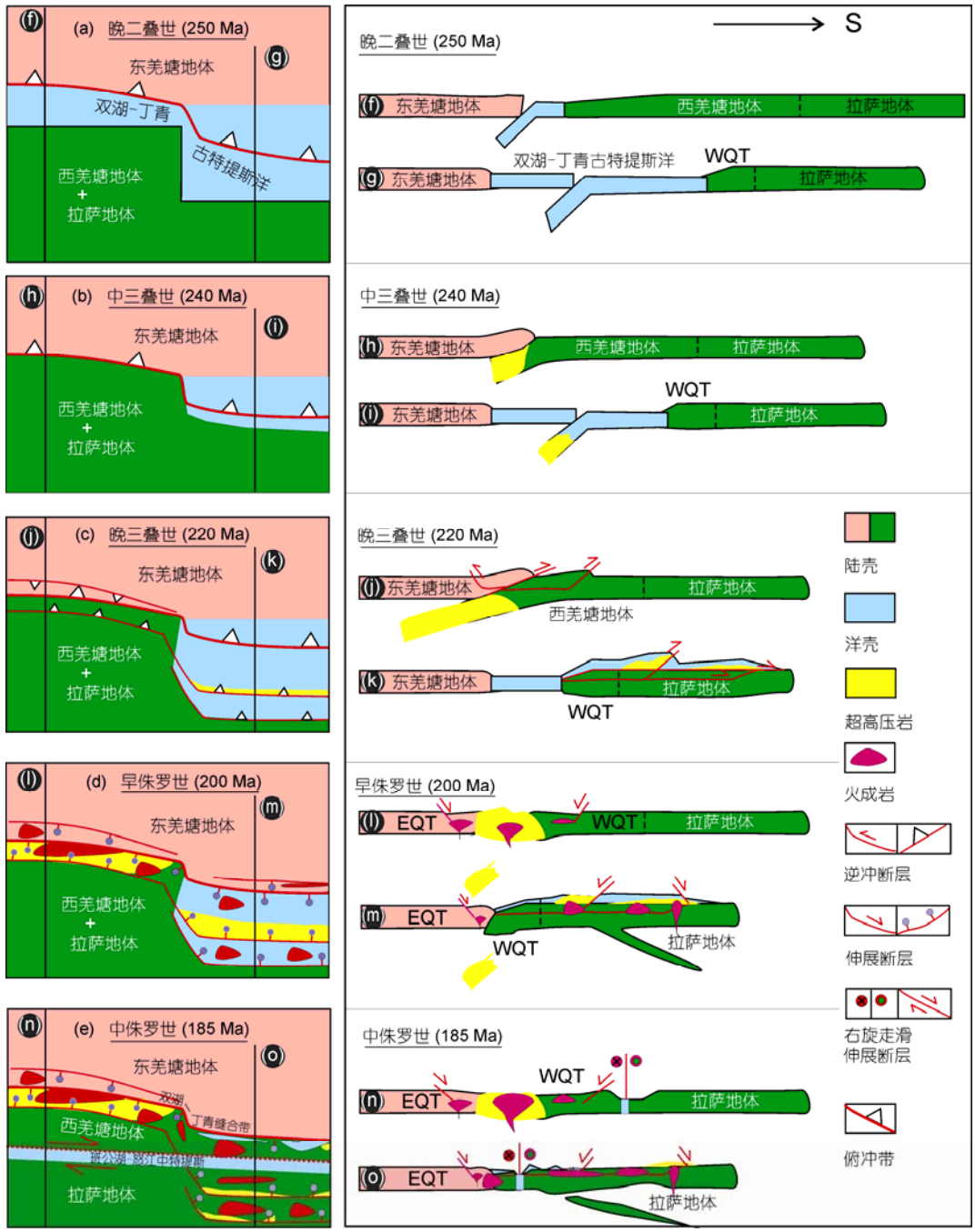


图 7　青藏高原腹地早中生代大地构造演化

EQT，东羌塘地体；WQT，西羌塘地体．解释详见正文

高原的构造拼贴历史至关重要．

(3) 超高压变质作用与青藏高原中生代盆地形成与供给关系研究．青藏高原上既有我国面积最大、序列最完毕的中生代浅海碳酸盐-碎屑岩盆地——羌塘和措勤盆地[30,56]，也有全球最大的复理石盆地——松潘-甘孜盆地[5]，班-怒构造带西部的侏罗纪复理石盆地也有相当的规模[30]．这些盆地不仅在时间上、在空间上，甚至在成盆机制上，都与这些超高压变质带密切相关．因此，超高压变质岩带的研究对于准确认识这些盆地成盆机制、沉积物质来源及后期演化，意

义十分重大.

(4) 超高压变质作用在特提斯域演化过程中的角色和意义. 当超高压变质岩折返回浅层地表时, 由于岩石圈拆沉, 往往伴随着广泛而强烈的伸展作用, 有此可能造成造山带解体, 甚至有可能产生新的洋盆. 因此需要关注新特提斯、中特提斯或其中的次一级边缘海盆地的形成和演化与这些超高压造山带解体的成因联系. 另一方面, 伴随超高压变质作用的岩石圈加厚往往导致地表地形的抬升, 由此可能引起特提斯域局部气候和环境的改变. 在这些研究中, 应特别注意辨别后期构造作用特别是构造缩短[71]对这些岩石和构造带的改造作用.

致谢 在此向郑永飞副主编的热情约稿和建设性讨论; 韦振权博士慷慨提供原始图片, 曾令森研究员提供尚未出版的数据; 不同时期的合作者以及多个实验室的同行给予的宝贵支持和帮助; 审稿专家细致、中肯的建议, 一并致以衷心的谢忱.

参考文献

1 郑永飞. 超高压变质与大陆碰撞研究进展: 以大别-苏鲁造山带为例. 科学通报, 2008, 53: 2129—2152
2 Ernst W G. Preservation/exhumation of ultrahigh-pressure subduction complexes. Lithos, 2006, 92: 321—335[doi]
3 Allègre C J, Courtillot V, Tapponnier P, et al. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt. Nature, 1984, 307: 17—22[doi]
4 Chang C F, Chen N S, Coward M P, et al. Preliminary conclusions of the Royal Society/Academia Sinica 1985 Geotraverse of Tibet. Nature, 1986, 323: 501—507[doi]
5 黄汲清, 陈炳蔚. 中国及邻区特提斯海的演化. 北京: 地质出版社, 1987. 1—78
6 Dewey J F, Shackleton R M, Chang C F, et al. The tectonic development of the Tibetan plateau. Phil Trans R Soc Lond A, 1988, 327: 379—413[doi]
7 中英青藏地质考察队. 青藏高原地质演化. 北京: 科学出版社, 1990. 1—415
8 Hsu K J, Pan G T, Sengör A M C, et al. Tectonic evolution of the Tibetan Plateau: A working hypothesis based on the archipelago model of orogenesis. Int Geol Rev, 1995, 37: 473—508[doi]
9 Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. Ann Rev Earth Planet Sci, 2000, 28: 211—280[doi]
10 Zhang K J, Cai J X, Zhang Y X, et al. Eclogites from central Qiangtang, northern Tibet (China) and tectonic implications. Earth Planet Sci Lett, 2006, 245: 722—729[doi]
11 李才, 翟庆国, 董永胜, 等. 青藏高原羌塘中部榴辉岩的发现及其意义. 科学通报, 2006, 51: 70—74
12 杨经绥, 许志琴, 耿全如, 等. 中国境内可能存在一条新的高压/超高压(?)变质带——青藏高原拉萨地体中发现榴辉岩带. 地质学报, 2006, 80: 1787—1792
13 杨经绥, 许志琴, 李天福, 等. 青藏高原拉萨地块中的大洋俯冲型榴辉岩: 古特提斯洋盆的残留? 地质通报, 2007, 26: 1277—1287
14 Zhang K J, Zhang Y X, Tang X C, et al. First report of eclogites from central Tibet, China: Evidence for ultradeep continental subduction prior to the Cenozoic India-Asian collision. Terra Nova, 2008, 20: 302—308[doi]
15 韦振权. 西藏蓬湖西蛇绿岩岩石学、地球化学和榴辉岩中的出溶物及其构造意义. 博士学位论文. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2007. 1—90
16 Pullen A, Kapp P, Gehrels G E, et al. Triassic continental subduction in central Tibet and Mediterranean-style closure of the Paleo-Tethys Ocean. Geology, 2008, 36: 351—354[doi]
17 曾令森, 刘静, 高利娥, 等. 青藏高原拉萨地块早中生代高压变质作用及大地构造意义. 地学前缘, 2009, 16: 140—151
18 熊兴国, 岳龙, 徐安全, 等. 西藏羌塘达尔应强过铝花岗岩地球化学特征及地球动力学意义. 沉积与特提斯地质, 2006, 26: 40—46
19 黄小鹏, 李才, 翟庆国. 西藏羌塘中部玛依岗日地区印支期花岗岩的地球化学特征及其形成环境. 地质通报, 2007, 26: 1646—1653
20 Kapp P, Yin A, Manning C E, et al. Tectonic evolution of the early Mesozoic blueschist-bearing Qiangtang metamorphic belt, central Tibet. Tectonics, 2003, 22(4): 1043
21 李延平, 林振宏, 郑建斌, 等. 羌塘盆地燕山早期花岗岩地球化学特征及构造意义. 大庆石油地质与开发, 2005, 24: 20—24

22 Guynn J H, Kapp P, Pullen A, et al. Tibetan basement rocks near Amdo reveal "missing" Mesozoic tectonism along the Bangong suture, central Tibet. Geology, 2006, 34: 505—508[doi]
23 青海省地质调查院. 青海省杂多县幅区域地质调查报告(1:250000). 2006. 1—246
24 刘琦胜, 江万, 简平, 等. 宁中白云母二长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及岩石地球化学特征. 岩石学报, 2006, 22: 643—652
25 和钟铧, 杨德明, 郑常青, 等. 西藏冈底斯带门巴地区印支期花岗岩地球化学特征及其构造意义. 地质通报, 2005, 24: 354—359
26 Chu M F, Chung S L, Song B, et al. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on the Mesozoic tectonics and crustal evolution of southern Tibet. Geology, 2006, 34: 745—748[doi]
27 和钟铧, 杨德明, 郑常青, 等. 冈底斯带门巴花岗岩同位素测年及其对新特提斯洋俯冲时代的约束. 地质论评, 2006, 52: 100—106
28 张宏飞, 徐旺春, 郭建秋, 等. 冈底斯南缘变形花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成: 新特提斯洋早侏罗世俯冲作用的证据. 岩石学报, 2007, 23: 1347—1353
29 张宏飞, 徐旺春, 郭建秋, 等. 冈底斯印支期造山事件: 花岗岩类锆石 U-Pb 年代学和岩石成因证据. 地球科学, 2007, 32: 155—166
30 西藏自治区地质矿产局. 西藏自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 1993. 1—707
31 王根厚, 贾建称, 万永平, 等. 藏东巴青县北部酉西岩组构造片理形成及构造意义. 地学前缘, 2006, 13: 180—187
32 Hu D G, Wu Z H, Jiang W, et al. *P-T-t* path of mafic granulite metamorphism in northern Tibet (Lhasa block) and its geodynamical implications. Acta Geol Sin, 2004, 78: 155—165
33 和钟铧, 杨德明, 王天武. 西藏嘉黎断裂带凯蒙蛇绿岩的年代学、地球化学特征及大地构造意义. 岩石学报, 2006, 22: 653—660
34 付修根, 王剑, 汪正江, 等. 藏北羌塘盆地菊花山地区火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征. 地质论评, 2008, 54: 232—242
35 王剑, 付修根, 陈文西, 等. 北羌塘沃若山地区火山岩年代学及区域地球化学对比——对晚三叠世火山-沉积事件的启示. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38: 33—43
36 白云山, 李莉, 牛志军, 等. 羌塘中部各拉丹冬一带鄂尔陇巴组火山岩特征及其构造环境. 地球学报, 2005, 26: 113—120
37 Hennig A. Petrography and geology of northwestern Tibet. In: Hedin S, ed. Southern Tibet. vol. 5. Norstedt: Stockholm, 1915. 1—220
38 Hedin S A. Central Asia Atlas. Stockholm: Statens Etnografiska, 1966
39 Kapp P, Yin A, Manning C E, et al. Blueschist-bearing metamorphic core complexes in the Qiangtang block reveal deep crustal structure of northern Tibet. Geology, 2000, 28: 19—22[doi]
40 Zhang K J. Blueschist-bearing metamorphic core complexes in the Qiangtang block reveal deep crustal structure of northern Tibet: Comment. Geology, 2001, 29: 90[doi]
41 Zhang K J, Zhang Y X, Xia B D, et al. Temporal variations of the Mesozoic sandstone composition in the Qiangtang block, northern Tibet (China): Implications for provenance and tectonic setting. J Sediment Res, 2006, 76: 1035—1048[doi]
42 Zhang K J, Zhang Y X, Li B, et al. The blueschist-bearing Qiangtang metamorphic belt (northern Tibet, China) as an *in situ* suture zone: Evidence from geochemical comparison with the Jinsa suture. Geology, 2006, 34: 493—496[doi]
43 Zhang K J, Zhang Y X, Li B, et al. Nd isotopes of siliciclastic rocks from Tibet: Constraints on the pre-Cenozoic tectonic evolution. Earth Planet Sci Lett, 2007, 256: 604—616
44 Ellis D J, Green D H. An experimental study on the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria. Contrib Mineral Petrol, 1979, 71: 13—22[doi]
45 Carswell D A, O'Brien P J, Wilson R N, et al. Thermobarometry of phengite-bearing eclogites in the Dabie Mountains of central China. J Metamorph Geol, 1997, 15: 239—252[doi]
46 Harlow G E. K in clinopyroxene at high pressure and temperature: An experimental study. Am Mineral, 1997, 82: 259—269
47 Harlow G E, Veblen D R. Potassium in clinopyroxene inclusions from diamonds. Science, 1991, 251: 652—655[doi]
48 Schulze D J, Helmstaedt H. Coesite-sanidine eclogites from kimberlite: Products of mantle fractionation or subduction? J Geol, 1988, 96: 435—443
49 Olsen J S, Gerward L, Jiang J Z. On the rutile/α-PbO_2-type phase boundary of TiO_2. J Phys Chem Solid, 1999, 60: 229—233[doi]
50 Hwang S L, Shen P, Chu H T, et al. Nanometer-size α-PbO_2-type TiO_2 in garnet: A thermobarometer for ultrahigh-pressure metamorphism. Science, 2000, 288: 321—324[doi]
51 Sobolev N V, Shatsky V S. Diamond inclusions in garnets from metamorphic rocks. Nature, 1990, 343: 742—746[doi]

52 Okamoto K, Maruyama S. Multi-anvil re-equilibration experiments of a Dabie Shan ultrahigh-pressure eclogite within the diamond-stability fields. Isl Arc, 1998, 7: 52—69[doi]

53 Ringwood A E, Major A. Synthesis of majorite and other high pressure garnets and perovskites. Earth Planet Sci Lett, 1971, 12: 411—418[doi]

54 王建平, 刘彦明, 李秋生, 等. 西藏班公湖-丁青蛇绿岩带东段侏罗纪盖层沉积的地层划分. 地质通报, 2002, 21: 405—410

55 李化启, 蔡志慧, 陈松永, 等. 拉萨地体中的印支造山事件及年代学证据. 岩石学报, 2008, 24: 1595—1604

56 Zhang K J, Xia B D, Liang X W. Mesozoic and Paleogene sedimentary facies and paleogeography of Tibet, western China: Tectonic implications. Geol J, 2002, 37: 217—246[doi]

57 Zhang K J, Li B, Wei Q G, et al. Proximal provenance of the western Songpan-Ganzi turbidite complex (Late Triassic, Eastern Tibetan Plateau): Implications for the tectonic amalgamations of China. Sediment Geol, 2008, 208: 36—44[doi]

58 Hacker B, Gnos E, Ratschbacher L, et al. Hot and dry deep crustal xenoliths from Tibet. Science, 2000, 287: 2463—2466[doi]

59 Haines S S, Klemperer S L, Brown L, et al. INDEPTH III seismic data: From surface observations to deep crustal processes in Tibet. Tectonics, 2003, 22: 1001[doi]

60 邓希光, 张进江, 张玉泉, 等. 藏北羌塘地块中部蓝片岩中捕获锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其意义. 地质通报, 2007, 26: 698—702

61 黎兵. 松潘-甘孜三叠纪复理石源区研究. 博士学位论文. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2008. 1—130

62 Girardeau J, Marcoux J, Allègre C J, et al. Tectonic environment and geodynamic significance of the Neo-Cimmerian Dongqiao ophiolite, Bangong-Nujiang suture zone, Tibet. Nature, 1984, 307: 27—31[doi]

63 杨子江, 李戚阳. 藏北若拉岗日结合带中的浅变质地层及其锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测定. 地质通报, 2006, 25: 118—123

64 Xu R H, Schärer U, Allègre C J. Magmatism and metamorphism in the Lhasa block (Tibet): A geochronological study. J Geol, 1985, 93: 41—57

65 杨德明, 李才, 郑常青. 西藏羌塘地区印支期火山岩构造地球化学特征. 长春科技大学学报, 2001, 31: 333—337

66 江万, 吴珍汉, 叶培盛, 等. 西藏拉萨地块中-新生代火山岩中多硅白云母捕虏晶特征及其地质意义. 现代地质, 2007, 21: 286—290

67 余光明, 王成善. 西藏特提斯沉积地质. 北京: 地质出版社, 1990. 1—185

68 Schneider W, Mattern F, Wang P J, et al. Tectonic and sedimentary basin evolution of the eastern Bangong-Nujiang zone (Tibet): A Reading cycle. Int J Earth Sci, 2003, 92: 228—254

69 杨经绥, 白文吉, 方青松, 等. 蛇绿岩中的一种超高压矿物——硅金红石. 自然科学进展, 2002, 12: 1220—1222

70 Chichester 钻石公司考察团. 西藏罗布莎和东巧地幔橄榄岩中不存在原生或残留的金刚石. 西藏地质, 1997, (1): 103—112

71 Wang C S, Zhao X X, Liu Z F, et al. Constraints on the early uplift history of the Tibetan Plateau. Proc Nat Acad Sci USA, 2008, 105: 4987—4992[doi]