

柴北缘超高压带中锡铁山榴辉岩的变质时代^{*}

宋述光¹ 张聪¹ 李献华² 张立飞¹

SONG ShuGuang¹, ZHANG Cong¹, LI XianHua² and ZHANG LiFei¹

1. 教育部造山带与地壳演化重点实验室, 北京大学地质系, 北京 100871

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

1. MOE Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Department of Geology, Peking University, Beijing 100871, China

2. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2010-11-10 收稿, 2011-01-06 改回.

Song SG, Zhang C, Li XH and Zhang LF. 2011. HP/UHP metamorphic time of eclogite in the Xitieshan terrane, North Qaidam UHPM belt, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4):1191–1197

Abstract Xitieshan terrane is located in the middle part of the North Qaidam ultrahigh-pressure (UHP) metamorphic belt. It is one of the important terranes in the belt and consists of granitic and pelitic gneisses with lesser lensoid blocks of eclogite and serpentinized peridotite without garnet. Most eclogite blocks were retrograde to varying extent with symplectite and amphibolite overprinting. Although numbered zircon U-Pb geochronological data have been reported in recent years, time for HP-UHP eclogite-facies metamorphism remains debatable, and interpretations for the previous age data contradict against UHP metamorphic ages that have determined from the Yuka eclogite, Luliangshan garnet peridotite and coesite-bearing metapelite in Dulan. Using techniques of CL and SIMS analyses, combining studies on mineral inclusions in zircons, we obtained an eclogite-facies metamorphic age of 433 ± 3 Ma (weighted mean). This age is consistent with metamorphic ages of Yuka eclogites and should represent HP-UHP metamorphic time for continental subduction. This study plays important role in understanding metamorphic evolution and deep subduction of continental crust in the Xitieshan eclogite-bearing terrane.

Key words HP-UHP metamorphic belt; Eclogite; Metamorphic age; Continental subduction; Xitieshan terrane; North Qaidam

摘要 锡铁山地体位于柴北缘超高压变质带的中部, 是柴北缘超高压变质带的重要组成部分。该地体由花岗质片麻岩、泥质片麻岩和相对较少的榴辉岩透镜体组成。大部分榴辉岩都经历了不同程度的后生合晶和角闪岩相退化变质改造。虽然近年来进行了大量的锆石 U-Pb 年代学研究, 但榴辉岩相高压-超高压变质的时代一直存在争议, 并且以前对锡铁山榴辉岩相变质时代的认识一直与相邻的绿梁山、鱼卡和其东部的都兰等地区的超高压变质年龄有明显的冲突。本文通过锡铁山榴辉岩锆石 U-Pb 年代学的研究, 获得榴辉岩相变质锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 433 ± 3 Ma, 与鱼卡地区榴辉岩的形成年龄一致, 代表大陆俯冲时期的高压-超高压变质年龄。该研究对进一步了解锡铁山榴辉岩地体的变质演化和大陆地壳深俯冲有重要意义。

关键词 高压-超高压变质带; 榴辉岩; 变质年龄; 大陆俯冲; 锡铁山地体; 柴北缘

中图法分类号 P588.348; P597.3

柴北缘超高压变质带位于我国西部青海境内, 自东向西延伸约 350km, 由都兰地体、锡铁山地体、绿梁山-鱼卡地体组成, 是典型的早古生代大陆型俯冲碰撞带。近 10 年来的研究揭示了该超高压变质带大洋、大陆地壳俯冲和折返的构造

过程和演化历史 (Yang *et al.*, 2001, 2002a, b, 2006; Song *et al.*, 2003a, b, 2004, 2005, 2006, 2007, 2009; Xu *et al.*, 2006; Mattinson *et al.*, 2006, 2007; Zhang J *et al.*, 2005, 2009; 宋述光等, 2009)。都兰超高压地体中超高压变质蛇

* 本文受国家基础科学发展规划项目(2009CB825007)和国家自然科学基金项目(40773012、40825007、40821002)联合资助。

第一作者简介: 宋述光, 男, 1963 年生, 博士生导师, 岩石学专业, E-mail: sgsong@pku.edu.cn

绿岩组合岩石的发现 (Song *et al.*, 2003a; 张贵宾等, 2005; Zhang G *et al.*, 2008, 2009) 证明了柴北缘超高压变质带经历了早期的大洋俯冲和晚期的大陆俯冲/碰撞的动力学过程。

大量的锆石年代学研究表明, 都兰地体大洋玄武岩变质的榴辉岩具有两阶段高压-超高压变质特征, 早期阶段为 473 ~ 443Ma, 代表大洋岩石圈俯冲的时代; 晚期阶段为 434 ~ 421Ma, 超高压变质的石榴石-蓝晶石云母片岩中含柯石英包裹体变质锆石加权平均年龄为 423 ± 6 Ma (Song *et al.*, 2006), 代表大陆地壳俯冲的时代 (Song *et al.*, 2006, 2009)。绿梁山石榴橄榄岩超高压变质年龄为 420 ~ 423Ma (Song *et al.*, 2005), 石榴石蓝晶石云母片岩的变质年龄为 427 ± 4.5 Ma (马旭东和陈丹玲, 2006)。鱼卡榴辉岩原岩为 ~ 850Ma 的大陆溢流玄武岩, 榴辉岩和变质泥质岩 (石榴石蓝晶石云母片岩) 的变质年龄为 430 ~ 435Ma (陈丹玲等, 2007; Chen *et al.*, 2009; Song *et al.*, 2010), 因此我们可以确定柴北缘大陆俯冲发生超高压变质的年龄范围为 435Ma 至 420Ma 之间。

近年来, 有关锡铁山榴辉岩及其围岩长英质片麻岩的锆石年龄也有大量的报道。Zhang J *et al.* (2005) 对锡铁山榴辉岩进行了研究, 获得榴辉岩的年龄为 ~ 480Ma, 并认为是榴辉岩相高压-超高压变质年龄。Zhang C (2011) 报道了锡铁山黄羊沟一带榴辉岩的年龄为 439 ± 8 Ma 和 461 ± 4 Ma。Zhang J *et al.* (2009) 通过石榴石-蓝晶石片麻岩和变质基性岩锆石年龄的进一步研究, 分别获得了 451 ~ 461Ma、423 ~ 430Ma 和 409Ma 三组年龄, 与都兰超高压地体的年龄谱一致 (Song *et al.* 2006; Mattinson *et al.*, 2006)。作者将第一组年龄解释为高压麻粒岩相退变质年龄 (锆石中含石榴石和金红石包裹体), 将第二组年龄解释为低压麻粒岩相-高角闪岩相退变质叠加年龄。但这种解释与鱼卡榴辉岩地体和都兰榴辉岩地体高压-超高压变质的年龄结构相矛盾。

另外, 在片麻岩中, 由于没有相应的高压-超高压变质矿物, 其变质年龄能否代表本区的高压-超高压变质时代也非常模糊, 并存在多解性。因此, 锡铁山地体的高压-超高压变质时代问题并没有完全解决。本文通过锡铁山榴辉岩中锆石的矿物包裹体、CL 图像和 U-Pb 年代学研究, 确定了锡铁山地体的榴辉岩相高压-超高压变质时代, 该研究对于认识柴北缘的变质演化历史有重要意义。

1 地质背景和榴辉岩特征

锡铁山含榴辉岩地体位于柴北缘超高压变质带的中部, 格尔木市之北约 130km 的锡铁山镇一带。地体的主构造线走向北西, 在地体的西南, 出露出一套绿片岩相变质的团洞山群火山岩, 并以产出铅锌矿而著名, 二者呈断层接触; 地体的东北被一红色的花岗岩体侵入 (图 1)。地体内部主要由长英质片麻岩、大小不等和不同程度退化变质的榴辉岩块体、

以及少量强烈蛇纹石化的橄榄岩块体构成, 大理岩少见。长英质片麻岩可分二云母长石片麻岩 (花岗质片麻岩) 和石榴石-蓝晶石 (夕线石)-云母片麻岩 (泥质片麻岩) 两类, 二者均为榴辉岩的寄主围岩。

锡铁山地体中, 榴辉岩岩块呈布丁状和透镜状分布于花岗质和泥质片麻岩中。大部分榴辉岩岩块都经历了强烈的角闪岩相退化变质叠加改造。地球化学分析表明榴辉岩的原岩具有 MORB 特征 (孟繁聪等, 2003; Yang *et al.*, 2006)。在锡铁山地体中零星出露的不含石榴石的蛇纹岩岩块与榴辉岩岩块共生, 与都兰等地的蛇纹石化方辉橄榄岩具有相似的特征, 可能代表古大洋蛇绿岩的碎片 (Zhang G *et al.*, 2005; Song *et al.*, 2009)。Zhang J *et al.* (2005, 2009) 利用石榴石-单斜辉石温度计和绿辉石中硬玉含量压力估计算锡铁山榴辉岩的变质温压条件为 $T = 770 \sim 830^\circ\text{C}$, $P > 14$ kbar。根据锡铁山榴辉岩的矿物组合特征, 张聪等 (2009) 识别出角闪石榴辉岩和多硅白云母榴辉岩两种类型, 并在绿辉石中发现柯石英假象, 利用 Grt-Omp-Ph 温压计获得其变质温压条件为 $T = 750 \sim 790^\circ\text{C}$, $P = 2.7 \sim 3.2$ GPa。

本文所研究的榴辉岩样品 (QL15) 采自全集峡, 岩石具有强的退化变质, 基质内的绿辉石均发生分解形成 Cpx + Pl 的后生合晶, 代表近等温降压过程中绿辉石分解的产物。后生合晶的边缘被后期角闪石交代, 为角闪岩相退化变质的叠加。少量绿辉石作为包裹体保留在石榴石中。

2 分析方法

锆石分选在廊坊地调院矿物分离实验室完成, 将 5kg 样品粉碎到 300 目, 利用重液和电磁法, 最后在双目镜下手工挑选出大约 300 粒锆石。将这些锆石颗粒装入 25mm 的树胶靶上, 磨掉约一半并抛光, 以便进行锆石阴极荧光和定年分析。锆石的阴极荧光图像分析在北京大学物理学院电镜实验室完成, 阴极荧光仪为 Garton 公司的 Mono CL3+, 加载到 FEI 公司 Quanta 200F 型场发射扫描电镜上, 扫描电镜的工作条件为 15kV 和 120nA, 扫描时间 20s。锆石内部矿物包裹体利用激光拉曼显微探针分析。锆石的 U-Th-Pb 定年在中国科学院地质与地球物理研究所离子探针实验室完成, 分析仪器为 Cameca IMS-1280。U-Th-Pb 比值和绝对含量用标准锆石 91500 (Wiedenbeck *et al.*, 1995) 进行校正, 以长期监测标准样品获得的标准偏差 ($1\text{SD} = 1.5\%$, Li *et al.*, 2010) 和单点测试内部精度共同传递得到样品单点误差, 详细的分析方法见 Li *et al.* (2009)。普通 Pb 用非放射性 ^{204}Pb 校正, 由于测得的普通 Pb 含量非常低, 假定普通 Pb 主要来源于制样过程中带入的表面 Pb 污染, 以现代地壳的平均 Pb 同位素组成 (Stacey and Kramers, 1975) 作为普通 Pb 组成进行校正。单一分析数据的误差为 1σ , 加权平均年龄计算采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄数据, 其置信水平 95%。数据结果处理采用 ISOPLLOT 软件 (Ludwig, 2001)。

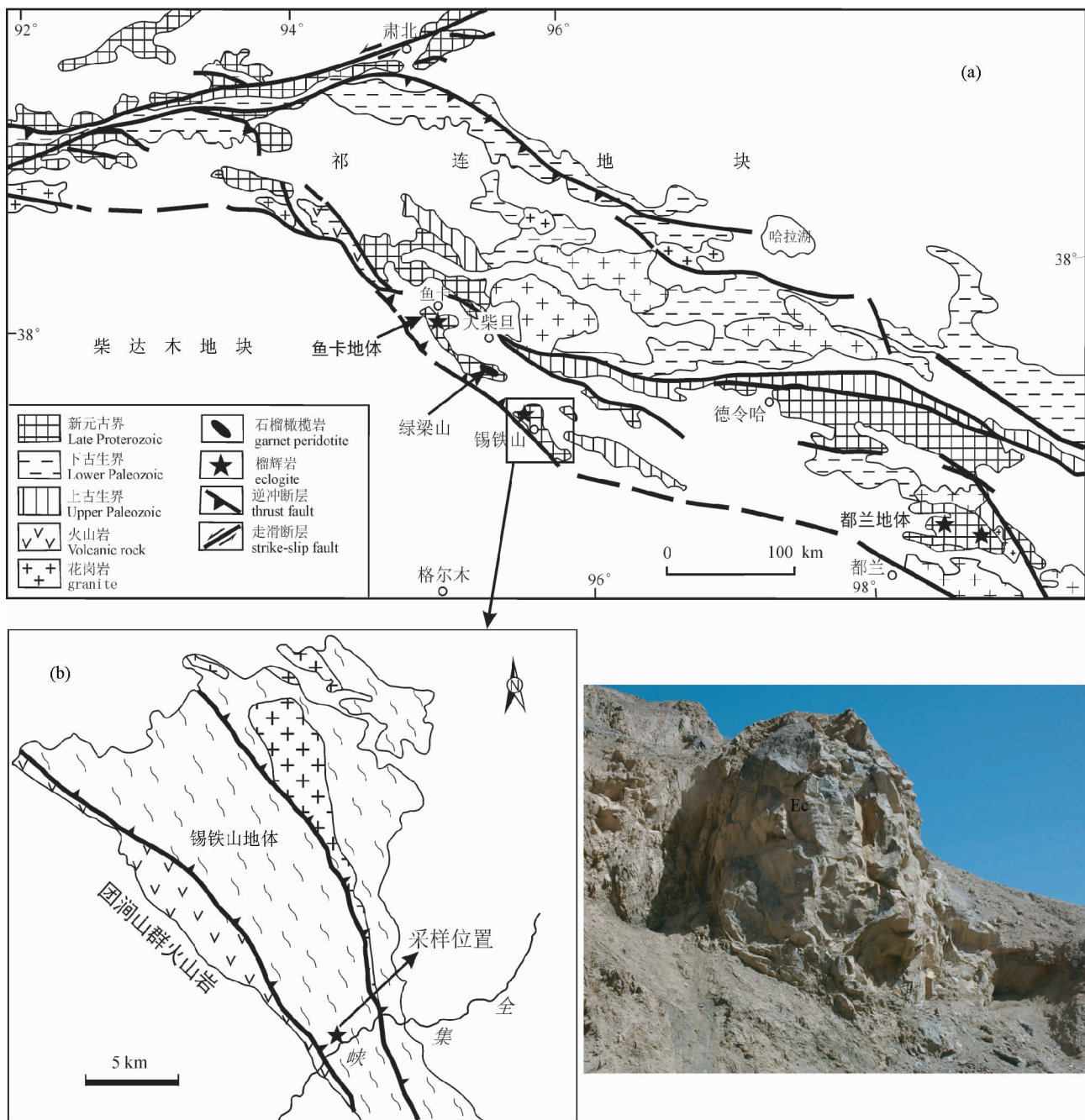


图1 柴北缘超高压变质带地质简图(a)、锡铁山地体地质图(b, 据 Zhang *et al.*, 2009 修改)及榴辉岩(Ec)透视镜体照片

Fig.1 Simplified geological map of the North Qaidam UHP belt (a) and geological map of Xitieshan terrane (b, after Zhang *et al.*, 2009) with a photograph of outcrop of eclogite block

3 分析结果

3.1 锆石的形态和矿物包裹体

榴辉岩样品(Q7-15)的锆石主要为卵圆形,显微镜下无

色,颗粒大小为 60~100 μm ,部分锆石保留有很小的残核(图2)。矿物包裹体在少数锆石颗粒中被发现(图2a, b),激光拉曼显微探针确定这些包裹体主要为石榴石、绿辉石和金红石,未见柯石英,表明是榴辉岩相变质期间锆石生长过程中捕获的。

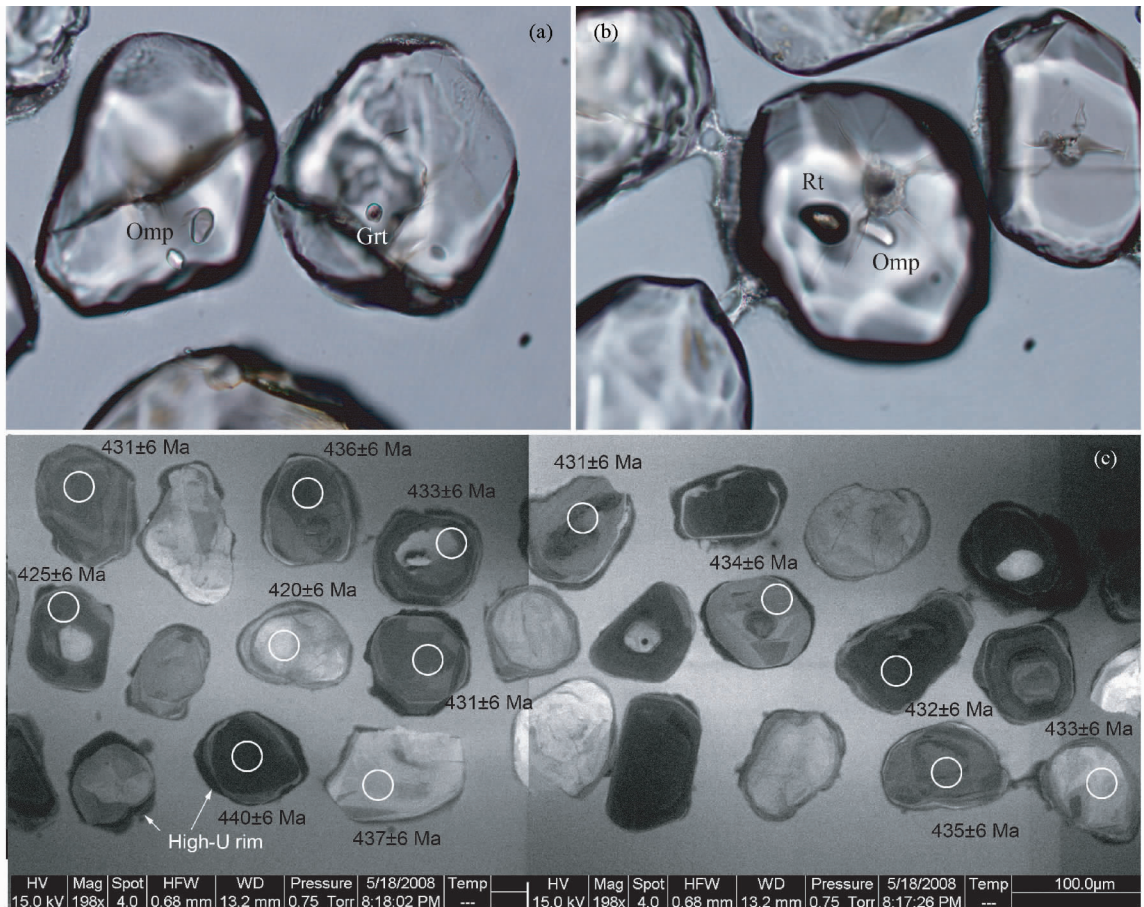


图2 锡铁山榴辉岩锆石及其内部石榴石 (Grt)、绿辉石 (Omp) 和金红石 (Rt) 包裹体(a, b)及锆石阴极荧光图像及测点(c)

Fig.2 Photomicrographs for zircons with garnet (Grt), omphacite (Omp) and rutile (Rt) inclusions (a, b) and CL images for zircons and analytic spots with ages (c)

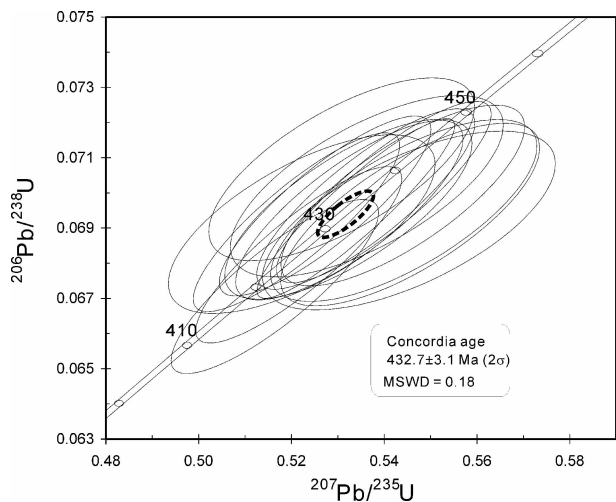


图3 锡铁山榴辉岩锆石 U-Pb 谐和年龄图解

Fig.3 Concordia diagram for zircons from the Xitieshan eclogite

阴极荧光图像显示锆石颗粒之间的明暗强度有变化, 锆石内部环带不明显或有弱的环带, 部分具有“杉树叶”结构, 反映典型的变质锆石特征。部分锆石具有窄的、不完整的暗变, 可能与后期变质过程中高 U 流体的作用有关。

3.2 U-Pb 年龄

榴辉岩锆石的 U-Th-Pb 分析结果见表 1, U-Pb 同位素谱和图解如图 3 所示。随机选择了 16 颗锆石进行了分析, 部分分析点位见图 2c。锆石 U 含量变化范围为 $152 \times 10^{-6} \sim 783 \times 10^{-6}$, Th 为 $2 \times 10^{-6} \sim 80 \times 10^{-6}$, Th/U 为 $0.01 \times 10^{-6} \sim 0.18 \times 10^{-6}$ 。测定的 16 个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 440 ~ 420Ma, 所有测点均位于 U-Pb 谐和线上, 其谐和年龄为 $433 \pm 3\text{Ma}$ (MSWD = 0.18) (加权平均年龄 $432.6 \pm 3.1\text{Ma}$, MSWD = 0.56)。该年龄代表了锡铁山榴辉岩的高压-超高压变质年龄。

表 1 锡铁山榴辉岩锆石的 SIMS 分析数据

Table 1 SIMS U-Th-Pb analyses for zircons from the Xitieshan eclogite

Sample/ spot [#]	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	f_{206}	Th/U meas	$\frac{207}{235}\text{Pb}$	$\pm\sigma$ (%)	$\frac{206}{238}\text{Pb}$	$\pm\sigma$ %	$\frac{207}{206}\text{Pb}$	$\pm\sigma$ %	$\frac{207}{206}\text{Pb}$	$\pm\sigma$ %	$\frac{207}{235}\text{Pb}$	Ma ($\pm\sigma$)	$\frac{206}{238}\text{Pb}$	Ma ($\pm\sigma$)
QL15@01	484	8	{0.49}	0.02	0.54534	2.37	0.0692	1.50	0.05714	1.83	0.06094	1.44	441.9 \pm 8.5	431.4 \pm 6.3		
QL15@02	379	17	{0.40}	0.04	0.54424	2.16	0.0695	1.52	0.05679	1.53	0.05995	1.20	441.2 \pm 7.7	433.1 \pm 6.4		
QL15@03	413	44	{0.01}	0.11	0.52108	1.75	0.0692	1.50	0.05464	0.89	0.05464	0.89	425.9 \pm 6.1	431.1 \pm 6.3		
QL15@04	137	2	{0.10}	0.02	0.53626	2.24	0.0702	1.50	0.05541	1.66	0.05621	1.51	436.0 \pm 8.0	437.3 \pm 6.4		
QL15@05	783	80	{0.00}	0.10	0.53389	1.63	0.0696	1.50	0.05567	0.64	0.05567	0.64	434.4 \pm 5.8	433.5 \pm 6.3		
QL15@06	124	5	{0.04}	0.04	0.53082	2.20	0.0707	1.50	0.05448	1.61	0.05448	1.61	432.4 \pm 7.8	440.2 \pm 6.4		
QL15@07	391	9	{0.00}	0.02	0.51642	1.77	0.0673	1.50	0.05562	0.94	0.05562	0.94	422.8 \pm 6.1	420.1 \pm 6.1		
QL15@08	277	9	{0.06}	0.03	0.54399	1.97	0.0699	1.50	0.05642	1.28	0.05691	1.22	441.1 \pm 7.1	435.7 \pm 6.3		
QL15@09	367	41	{0.03}	0.11	0.52222	2.25	0.0691	1.50	0.05480	1.68	0.05480	1.68	426.6 \pm 7.9	430.8 \pm 6.3		
QL15@10	433	45	{0.01}	0.10	0.52157	1.74	0.0682	1.50	0.05543	0.88	0.05543	0.88	426.2 \pm 6.1	425.5 \pm 6.2		
QL15@11	426	77	{0.00}	0.18	0.52727	1.77	0.0696	1.50	0.05492	0.93	0.05492	0.93	430.0 \pm 6.2	433.9 \pm 6.3		
QL15@12	152	3	{0.07}	0.02	0.54561	2.09	0.0694	1.53	0.05703	1.43	0.05703	1.43	442.1 \pm 7.5	432.4 \pm 6.4		
QL15@13	354	34	{0.00}	0.10	0.53603	1.79	0.0698	1.50	0.05568	0.98	0.05568	0.98	435.8 \pm 6.4	435.1 \pm 6.3		
QL15@14	208	21	{0.04}	0.10	0.53228	2.05	0.0695	1.50	0.05552	1.39	0.05552	1.39	433.3 \pm 7.2	433.4 \pm 6.3		
QL15@15	406	4	{0.02}	0.01	0.53993	1.75	0.0700	1.50	0.05592	0.90	0.05592	0.90	438.4 \pm 6.3	436.3 \pm 6.3		
QL15@16	413	26	{0.00}	0.06	0.53249	1.88	0.0695	1.50	0.05556	1.13	0.05556	1.13	433.5 \pm 6.7	433.2 \pm 6.3		

注: f_{206} 为普通 ^{206}Pb 与总 ^{206}Pb 的百分比

4 构造意义

4.1 榴辉岩的原岩

柴北缘榴辉岩的原岩可以划分为 2 种类型: (1) 来自早期俯冲大洋岩石圈的蛇绿岩组合; (2) 来自俯冲的大陆地壳上的大陆溢流玄武岩。

典型的大洋蛇绿岩组合主要分布于都兰超高压变质地体 (Song *et al.*, 2003b, 2006; Zhang G *et al.*, 2008), 该蛇绿岩组合由强烈蛇纹石化的地幔方辉橄榄岩、超基性-基性堆晶岩 (超高压变质的蓝晶石榴辉岩) 和玄武岩变质的榴辉岩组成, 其中沙柳河超高压变质蛇绿岩的原岩形成年龄为 $\sim 517\text{Ma}$ (Zhang G *et al.*, 2008)。

原岩来自大陆溢流玄武岩的榴辉岩以鱼卡地区的榴辉岩为代表, 地球化学分析表明这些榴辉岩原岩可以划分出低 Ti ($\text{TiO}_2 < 2.5\%$, $\text{Ti}/\text{Y} < 500$) 和高 Ti ($\text{TiO}_2 > 2.5\%$, $\text{Ti}/\text{Y} > 500$) 两组玄武岩成分, 具有典型的 OIB 和 E-MORB 微量元素特征, 与峨眉山等典型大陆溢流玄武岩十分相似 (Chen *et al.*, 2009; Song *et al.*, 2010)。锆石定年确定其原岩岩浆结晶年龄为 $\sim 850\text{Ma}$, 为 Rodinia 超大陆裂解的超级地幔柱初始活动的产物 (Song *et al.*, 2010)。

由于大陆俯冲、碰撞以及后期的折返, 不同来源的岩石, 包括大陆地壳成分岩石、大陆边缘的沉积岩、大洋岩石圈的蛇绿岩残片都可以相互混杂而共同产于大陆俯冲带中。由于 Rodinia 超大陆的裂解时间在 $750 \sim 820\text{Ma}$ (Li *et al.*, 1999), 大洋地壳的年龄最早也可以接近 800Ma , 从而使部分原岩为大洋玄武岩的榴辉岩难以与原岩为大陆溢流玄武

岩的榴辉岩进行区分。从锡铁山榴辉岩的锆石定年情况看, 部分榴辉岩的锆石核部年龄为 $750 \sim 870\text{Ma}$ (Zhang J *et al.*, 2005; Zhang C *et al.*, 2011), 虽然这些年龄由于榴辉岩相变质的改造而不再准确, 但可以大致反映原岩的形成时代, 同时也反映部分具有与鱼卡榴辉岩原岩相同的成因。而锡铁山地体中, 不含石榴石的蛇纹石化橄榄岩可能表明了大洋蛇绿岩残片的存在。

4.2 锡铁山地体高压超高压变质时代

都兰地体沙柳河蛇绿岩原岩的形成年龄限定了大洋俯冲的时代不应早于 500Ma , 而大陆俯冲时代是在大洋岩石圈完全消亡之后发生的。通过都兰地区榴辉岩和泥质片麻岩榴辉岩相的变质年龄可以划分为 $460 \sim 440\text{Ma}$ 和 $430 \sim 420\text{Ma}$ 两个阶段 (Song *et al.*, 2006, 2009), 分别代表大洋俯冲和大陆俯冲的高压和超高压变质事件。绿梁山石榴橄榄岩的变质年龄为 $420 \sim 423\text{Ma}$, 代表大陆深俯冲到 $\sim 200\text{km}$ 深度时发生的变质; 鱼卡榴辉岩的形成深度为 $70 \sim 100\text{km}$ (Zhang *et al.*, 2005), 榴辉岩相变质年龄 ($430 \sim 435\text{Ma}$) 比绿梁山石榴橄榄岩略早。

张建新及其合作者对锡铁山榴辉岩和片麻岩锆石进行了大量的定年工作 (Zhang J *et al.*, 2005, 2006, 2007, 2009)。利用锆石 TIMS 和 SHRIMP U-Pb 定年, Zhang J *et al.* (2005) 获得了榴辉岩变质年龄为 $480 \sim 486\text{Ma}$ 和原岩的岩浆结晶年龄 $750 \sim 800\text{Ma}$, 角闪石的 Ar/Ar 年龄 407Ma 。张建新等 (2007) 获得绿梁山退变榴辉岩锆石 SHRIMP 年龄范围为 $426 \sim 467\text{Ma}$, 并进一步划分为 $452 \pm 12\text{Ma}$ 和 $430 \pm 4\text{Ma}$ 两组, 但作者将前者解释为麻粒岩相改造年龄, 后者解释为角

闪岩相退化变质年龄,而没有榴辉岩相变质年龄。通过锆石 TIMS 分析,Zhang *et al.* (2006) 获得了锡铁山花岗质片麻岩的上交点年龄 952 ± 13 Ma, 下交点年龄 478 ± 43 Ma; Zhang J *et al.* (2009) 又报道了石榴石蓝晶石云母片麻岩锆石的 SHRIMP 年龄为 461 Ma, 石榴石-夕线石片麻岩的年龄为 423 ~ 430 Ma。因此,Zhang *et al.* (2009) 认为锡铁山地体的高压-超高压变质年龄为 ~ 480 Ma, 麻粒岩相和角闪岩相退化变质年龄为 450 ~ 423 Ma。这些年龄的解释与柴北缘其他地体高压-超高压变质年龄有明显的矛盾。

一般认为,锆石是十分稳定的矿物,在榴辉岩相高压-超高压变质过程中结晶的锆石在退化变质过程中很难被完全改造。退变榴辉岩中交互生长的单斜辉石-斜长石组合为后生合晶,系绿辉石降压过程中自身分解的产物,与石榴石之间并不平衡,不能用后生合晶结构的 Cpx + Pl 与 Grt 进行温压计算。锆石的生长主要发生在榴辉岩相变质过程中,其年龄应代表榴辉岩相变质年龄而不是角闪岩相改造年龄。本文研究的榴辉岩虽然发生了明显的后生合晶和角闪岩相退化变质,但其中的锆石只有很小的变化,部分出现了很窄的高 U 生长边,内部主要的部分含有榴辉岩相变质矿物,获得的 433 ± 3 Ma 的年龄与鱼卡榴辉岩的时代一致,代表了锡铁山榴辉岩的高压-超高压变质年龄。

致谢 锆石阴极荧光图像分析得到了北京大学物理学院电镜室陈莉的帮助,锆石 SIMS 定年得到科学院地质与地球物理研究所刘宇的帮助,匿名评审人提出了宝贵的修改意见,在此深表感谢。

谨以此文祝贺沈其韩先生 90 华诞。

References

- Chen DL, Sun Y and Liu L. 2007. The metamorphic ages of the country rock of the Yukhe eclogites in the North Qaidam and its geological significance. *Earth Science Frontiers*, 14: 108 - 116 (in Chinese with English abstract)
- Chen DL, Liu L and Sun Y. 2009. Geochemistry and zircon U-Pb dating and its implications of the Yukhe HP/UHP terrane, the North Qaidam, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35: 259 - 272
- Li QL, Li XH, Liu Y, Tang GQ, Yang JH and Zhu WG. 2010. Precise U-Pb and Pb-Pb dating of Phanerozoic baddeleyite by SIMS with oxygen flooding technique. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 25: 1107 - 1113
- Li XH, Liu Y, Li QL, Guo CH and Chamberlain KR. 2009. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multicollector SIMS without external standardization. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 10, Q04010, doi:10.1029/2009GC002400
- Li ZX, Li XH, Kinny PD and Wang J. 1999. The breakup of Rodinia: Did it start with a mantle plume beneath South China? *Earth and Planetary Science Letters* 173, 171 - 181
- Ludwig, KR. 2001. Users Manual for Isoplot/Ex rev. 2. 49. Berkeley Geochronology Centre Special Publication. No. 1a, 56
- Ma XD and Chen DL. 2006. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of quartzofeldspathic gneisses, the country rocks of ultrahigh-pressure metamorphic rocks on the northern margin of the Qaidam basin, Northwest China. *Geological Bulletin of China*, 25: 99 - 103 (in Chinese with English abstract)
- Mattinson CG, Wooden JL, Liou JG, Bird DK and Wu CL. 2006. Age and duration of eclogite-facies metamorphism, North Qaidam HP/UHP terrane, western China. *American Journal of Science*, 306: 683 - 711
- Mattinson CG, Menold CA, Zhang JX and Bird DK. 2007. High- and ultrahigh-pressure metamorphism in the North Qaidam and South Altyn Terranes, western China. *International Geology Review*, 49: 969 - 995
- Meng FC, Zhang JX, Yang JS and Xu ZQ. 2003. Geochemical characteristics of eclogites in Xitieshan area, North Qaidam of northwestern China. *Acta Petrologica Sinica*, 19: 435 - 442 (in Chinese with English abstract)
- Song SG, Yang JS, Liou JG, Wu CL, Shi RD and Xu ZQ. 2003a. Petrology, geochemistry and isotopic ages of eclogites in the Dulan UHPM terrane, the North Qaidam, NW China. *Lithos*, 70: 195 - 211
- Song SG, Yang JS, Xu ZQ, Liou JG and Shi RD. 2003b. Metamorphic evolution of the coesite-bearing ultrahigh-pressure terrane in the North Qaidam, northern Tibet, NW China. *Journal of Metamorphic Geology*, 21: 631 - 644
- Song SG, Zhang LF and Niu YL. 2004. Ultra-deep origin of garnet peridotite from the North Qaidam ultrahigh-pressure belt, Northern Tibetan Plateau, NW China. *American Mineralogist*, 89: 1330 - 1336
- Song SG, Zhang LF, Niu YL, Su L, Jian P and Liu DY. 2005. Geochronology of diamond-bearing zircons from garnet-peridotite in the North Qaidam UHPM belt, North Tibetan Plateau: A record of complex histories associated with continental collision. *Earth and Planetary Science Letters*, 234: 99 - 118
- Song SG, Zhang LF, Niu YL, Su L, Song B and Liu DY. 2006. Evolution from oceanic subduction to continental collision: A case study of the Northern Tibetan Plateau inferred from geochemical and geochronological data. *Journal of Petrology*, 47: 435 - 455
- Song SG, Su L, Niu Y and Zhang LF. 2007. Petrological and geochemical constraints on the origin of garnet peridotite in the North Qaidam ultrahigh-pressure metamorphic belt, northwestern China. *Lithos*, 96: 243 - 265
- Song SG, Su L, Niu Y, Zhang GB and Zhang LF. 2009. Two types of peridotite in North Qaidam UHPM belt and their tectonic implications for oceanic and continental subduction: A review. *Journal of Asian Earth Science*, 35: 285 - 297
- Song SG, Niu YL, Zhang LF and Zhang GB. 2009. Time constraints on orogenesis from oceanic subduction to continental subduction, collision, and exhumation: An example from North Qilian and North Qaidam HP-UHP belts. *Acta Petrologica Sinica*, 25: 2067 - 2077 (in Chinese with English abstract)
- Song SG, Su L, Li XH, Zhang GB, Niu YL and Zhang LF. 2010. Tracing the 850Ma continental flood basalts from a piece of subducted continental crust in the North Qaidam UHPM belt, NW China. *Precambrian Research*, 183: 805 - 816
- Stacey JS and Kramers JD. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, 26: 207 - 221
- Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, Griffin WL, Meier M, Oberli F, Vonquadt A, Roddick JC and Spiegel W. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace-element and REE analyses. *Geostandard Newsletters*, 19:1 - 23
- Xu ZQ, Yang JS, Wu CL *et al.* 2006. Timing and mechanism of formation and exhumation of the Northern Qaidam ultrahigh-pressure metamorphic belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28: 160 - 173
- Yang JS, Xu ZQ, Song SG, Zhang JX, Wu CL, Shi RD, Li HB and Brunel M. 2001. Discovery of coesite in the North Qaidam Early Palaeozoic ultrahigh pressure (UHP) metamorphic belt, NW China. *Comptes Rendus De L Academie Des Sciences Serie II Fascicule A-Sciences De La Terre et Des Planetes*, 333(11): 719 - 724

- Yang JS, Xu ZQ, Song SG, Zhang JX, Wu CL, Shi RD, Li HB, Brunel M and Tapponnier P. 2002a. Subduction of continental crust in the Early Paleozoic North Qaidam ultrahigh-pressure metamorphism belt, NW China: Evidence from the discovery of coesite in the belt. *Acta Geologica Sinica*, 76: 63–68
- Yang JS, Xu ZQ, Zhang JX, Song SG, Wu CL, Shi RD, Li HB and Brunel M. 2002b. Early Palaeozoic North Qaidam UHP metamorphic belt on the northeastern Tibetan plateau and a paired subduction model. *Terra Nova*, 14(5): 397–404
- Yang JS, Wu CL, Zhang JX, Shi RD, Meng FC, Wooden J and Yang HY. 2006. Protolith of eclogites in the north Qaidam and Altun UHP terrane, NW China: Earlier oceanic crust? *Journal of Asian Earth Sciences*, 28: 185–204
- Zhang C, Zhang LF, Zhang GB and Song SG. 2009. Petrology and calculation of retrograde *PT* path of eclogites from Xitieshan, North Qaidam, China. *Acta Petrologica Sinica*, 25: 2247–2259 (in Chinese with English abstract)
- Zhang C, Zhang LF, van Roermund H, Song SG and Zhang GB. 2011. Petrology and geochronology (SHRIMP U-Pb dating) of some Xitieshan eclogites, North Qaidam (U) HP metamorphic belt, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, in press
- Zhang GB, Song SG, Zhang LF, Niu Y and Shu GM. 2005. Ophiolite-type mantle peridotite from Shaliuhe, North Qaidam UHPM belt, NW China and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 1049–1058 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GB, Song SG, Zhang LF and Niu Y. 2008. The subducted oceanic crust within continental-type UHP metamorphic belt in the North Qaidam, NW China: Evidence from petrology, geochemistry and geochronology. *Lithos*, 104: 99–108
- Zhang GB, Zhang LF, Song SG and Niu YL. 2009. UHP metamorphic evolution and SHRIMP dating of meta-ophiolitic gabbro in the North Qaidam, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35: 310–322
- Zhang JX, Yang JS, Mattinson CG, Xu ZQ, Meng FC and Shi RD. 2005. Two contrasting eclogite cooling histories, North Qaidam HP/UHP terrane, western China: Petrological and isotopic constraints. *Lithos*, 84: 51–76
- Zhang JX, Yang JS, Meng FC, Wan YS, Li HB and Wu CL. 2006. U-Pb isotopic studies of eclogites and their host gneisses in the Xitieshan area of the North Qaidam Mountains, western China: New evidence for an Early Paleozoic HP-UHP metamorphic belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28: 143–150
- Zhang JX, Meng FC, Yu SY and Qi XX. 2007. Metamorphic history recorded in high pressure mafic granulites in the Luliangshan Mountains to the north of Qaidam Basin, northwest China: Evidence from petrology and zircon SHRIMP geochronology. *Earth Science Frontiers*, 14: 85–97 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JX, Mattinson CG, Meng FC, Yang HJ and Wan YS. 2009. U-Pb geochronology of paragneisses and metabasite in the Xitieshan area, North Qaidam Mountains, western China: Constraints on the exhumation of HP/UHP metamorphic rocks. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35: 245–258

附中文参考文献

- 陈丹玲, 孙勇, 刘良. 2007. 柴北缘鱼卡河榴辉岩围岩的变质时代及其地质意义. *地学前缘*, 14: 108–116
- 马旭东, 陈丹玲. 2006. 柴达木盆地北缘超高压变质岩的围岩长英质片麻岩锆石 LA-ICP-MS 定年. *地质通报*, 25: 99–103
- 孟繁聪, 张建新, 杨经绥, 许志琴. 2003. 柴北缘锡铁山榴辉岩的地球化学特征. *岩石学报*, 19: 435–442
- 宋述光, 牛耀龄, 张立飞, 张贵宾. 2009. 大陆造山运动: 从大洋俯冲到大陆俯冲、碰撞、折返的时限——以北祁连山、柴北缘为例. *岩石学报*, 25: 2067–77
- 张聪, 张立飞, 张贵宾, 宋述光. 2009. 柴北缘锡铁山一带榴辉岩的岩石学特征及其退变 *PT* 轨迹. *岩石学报*, 25: 2247–2259
- 张贵宾, 宋述光, 张立飞等. 2005. 柴北缘超高压变质带沙柳河蛇绿岩型地幔橄辉岩及其意义. *岩石学报*, 21: 1049–1058
- 张建新, 孟繁聪, 于胜尧等. 2007. 柴北缘绿梁山高压基性麻粒岩的变质演化历史: 岩石学及锆石 SHRIMP 年代学证据. *地学前缘*, 14: 85–97