

# 柴北缘超高压变质带的冷却历史:来自副片麻岩中锆石、金红石的 U-Pb 年代学和温度信息\*

张贵宾 张立飞 宁远煜 韩磊

ZHANG GuiBin, ZHANG LiFei, NING YuanYu and HAN Lei

造山带与地壳演化教育部重点实验室,北京大学地球与空间科学学院,北京 100871

Key Laboratory of Orogen and Crust Evolution, MOE, School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China

2014-03-30 收稿, 2014-07-21 改回.

Zhang GB, Zhang LF, Ning YY and Han L. 2014. Cooling history for North Qaidam UHPM belt: Constraints from zircon, rutile U-Pb dating and thermometry in paragneiss. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10):2835–2842

**Abstract** We analyzed zircon and rutile U-Pb ages and trace elements using LA-ICP-MS and SIMS of paragneiss from Shaliuhe cross-section, North Qaidam ultra-high pressure metamorphic belt. Inherited zircon cores record older protolith ages of > 700Ma. While metamorphic zircon rims give weighted average U-Pb age of  $425 \pm 6$ Ma, and corresponding  $T_{\text{Ti-in-zircon}} = 689 \pm 14^\circ\text{C}$ . The rutile give a U-Pb age of  $414.0 \pm 6.3$ Ma, which may represent the time of the paragneiss cooled down to the closure temperature of U-Pb in rutile (here, taken as about  $570^\circ\text{C}$ ). The rutile thermometry of Zr-in-rutile gives same temperature of  $685 \pm 9^\circ\text{C}$  as the zircon thermometry. This indicates both rutile and zircon may preserve the peak metamorphic temperature information. We can construct a  $T-t$  path that starts at conditions and time given by the zircon temperature and U-Pb age, and ends with passage through the rutile closure temperature and the rutile age. A cooling rate of about  $11^\circ\text{C}/\text{Myr}$  is obtained through this  $T-t$  path. Compared with the literature rutile data of eclogites (Yuka and North Dulan) from this belt, country paragneiss rocks experienced similar cooling history as the enclosed eclogites.

**Key words** Rutile; Zircon; U-Pb dating; Zr-in-rutile thermometry; Ti-in-zircon thermometry; North Qaidam UHPM belt

**摘要** 本文运用 LA-ICP-MS 和 SIMS 对柴北缘超高压变质带中东端沙柳河剖面中的副片麻岩进行了锆石和金红石 U-Pb 年代和微量元素分析。锆石边部的变质时代为  $425 \pm 6$ Ma, 所对应的锆石 Ti 含量温度计计算出的温度为  $689 \pm 14^\circ\text{C}$ 。金红石 U-Pb 定年给出的年龄为  $414.0 \pm 6.3$ Ma, 代表了副片麻岩在折返过程中冷却到金红石 U-Pb 封闭温度约  $570^\circ\text{C}$  的时代。而金红石 Zr 含量温度计给出同锆石边部较一致的温度  $685 \pm 9^\circ\text{C}$ , 代表了峰期变质时代的温度条件。根据锆石的变质时代和变质温度以及金红石的冷却年龄和封闭温度所限定的  $T-t$  轨迹, 可以得出此副片麻岩在折返过程中的冷却速率约为  $11^\circ\text{C}/\text{Myr}$ 。

**关键词** 金红石; 锆石; U-Pb 定年; 金红石温度计; 锆石温度计; 柴北缘超高压变质带

**中图法分类号** P588.345; P597.3

金红石( $\text{TiO}_2$ )作为副矿物常出现于岩浆岩和高级变质岩中, 也作为碎屑矿物出现于沉积岩中。早期研究认为金红石中 U 含量较低并含较高的初始 Pb, 所以其不利于 U-Pb 定年 (Ireland and Williams, 2003)。但最近 Li *et al.* (2011) 指出, 离子探针微区分析获得较 TIMS 方法高的多的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值, 说明之前所认识的金红石含有较高的初始 Pb 可能是由矿物包体导致的。但对于 U-Pb 体系, 金红石具有较低的

封闭温度 ( $490^\circ\text{C}$  以下无明显 Pb 扩散, Kooijman *et al.*, 2010), 所以其可以用来限定变质岩的冷却历史 (Mezger *et al.*, 1989, 1991; Li *et al.*, 2003; Kooijman *et al.*, 2010; Meinhold, 2010)。锆石作为另一个得到更广泛应用的副矿物, 具有较高的 U-Pb 封闭温度 (Cherniak and Watson, 2001), 结合 Ti-in-zircon 温度计能够同时提供锆石结晶/受改造的时代和温度信息 (Rubatto *et al.*, 1999, 2002; Rubatto

\* 本文受国家自然科学基金项目(41272068, 41121062, 41090371)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-13-0017)联合资助。

第一作者简介: 张贵宾, 男, 1979 年生, 副教授, 从事岩石学研究, E-mail: gbzhang@pku.edu.cn

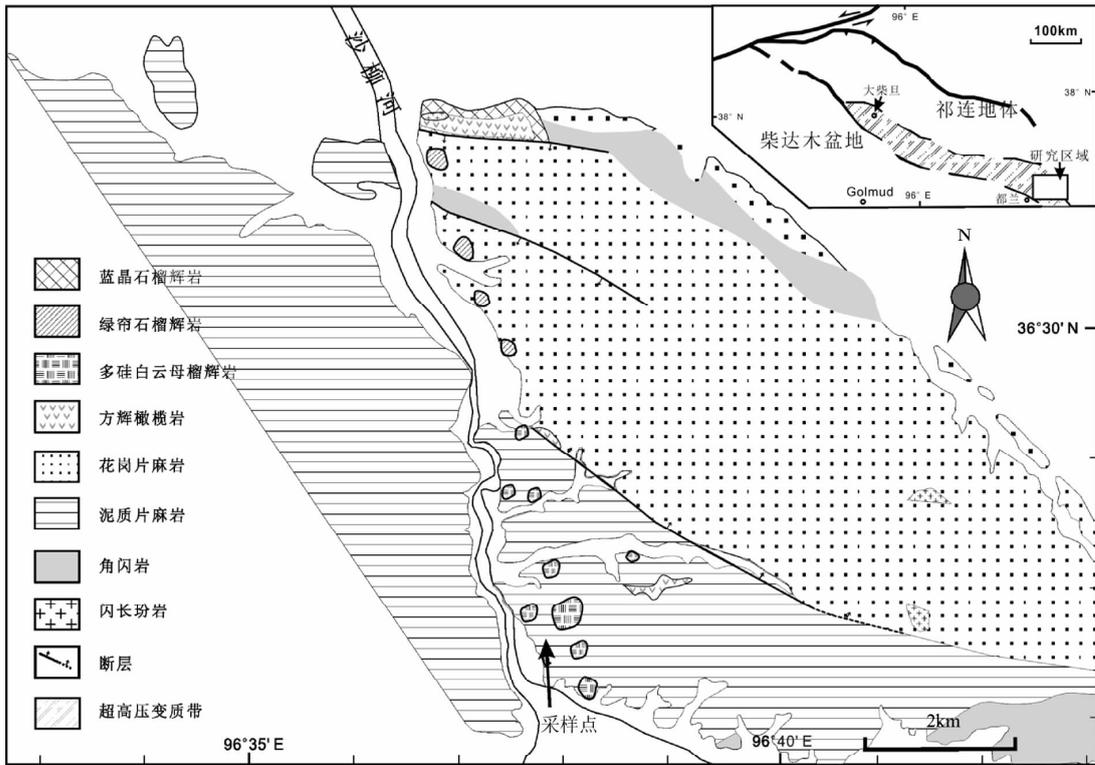


图1 柴北缘超高压变质带东端都兰地体沿沙柳河剖面地质简图(据 Zhang *et al.*, 2008 修改)

Fig.1 Geological sketch map of the Shaliuhe cross-section in North Qaidam UHPM belt (after Zhang *et al.*, 2008)

and Hermann, 2007; Ferry and Watson, 2007)。

柴北缘超高压变质带位于青藏高原的东北边缘,出露有曾经在古生代发生过深俯冲的榴辉岩和围岩片麻岩(Yang *et al.*, 2001, 2002; 杨经绥等, 2003; Song *et al.*, 2003a, b; Zhang *et al.*, 2005b, 2008, 2009a, b, c, 2010a, b; 张贵宾等, 2005a)。岩石学研究所限定的  $P-T$  轨迹表明此带不同地体出露的岩石经历了不同的热演化历史(详见综述文章 Zhang *et al.*, 2013; Song *et al.*, 2014)。此前, Zhang *et al.* (2005b)对鱼卡和锡铁山的榴辉岩进行了详细的锆石 U-Pb 定年和角闪石白云母  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  定年,并得出两地体经历了快慢迥异的冷却历史(鱼卡:  $13 \sim 19^\circ\text{C}/\text{Myr}$ , 锡铁山:  $3 \sim 4^\circ\text{C}/\text{Myr}$ )。而对于此带中国岩片麻岩的变质时代已有大量研究,但对其在折返过程中的热演化和时代仍缺少研究。

本文中,我们对柴北缘超高压变质带沙柳河剖面中的副片麻岩进行了锆石和金红石的 U-Pb 年代和对应的微量元素温度计计算,以探讨其在折返过程中的冷却历史。

## 1 地质背景

柴北缘超高压变质带位于青海省境内,青藏高原的东北缘,沿柴达木盆地的北缘呈 NWW-SEE 走向展布。北侧是祁连山地体,南侧为柴达木地体,东接秦岭造山带(图1),其西端被阿尔金断裂所切。柴北缘超高压变质带自西向东主要出

露于鱼卡、绿梁山、锡铁山和都兰四个区域。此带中,柯石英包裹体首先发现于都兰北带泥质片麻岩的锆石中(Yang *et al.*, 2001; Song *et al.*, 2003a),之后在都兰和鱼卡榴辉岩薄片以及都兰和锡铁山榴辉岩的锆石中有新的柯石英包裹体被发现(Zhang *et al.*, 2009a, b, c, 2010b; Liu *et al.*, 2012)。绿梁山石榴橄榄岩的锆石中发现有金刚石包体(Song *et al.*, 2005)。众多年代学研究表明此带的峰期变质时代集中于晚奥陶纪到早志留纪(Zhang *et al.*, 2013; Song *et al.*, 2014),表明柴北缘可能作为一个整体在早古生代发生了深俯冲而经历过超高压变质作用。

本文中所研究的区域位于此带东端都兰地体的沙柳河剖面,出露有花岗质和泥质片麻岩以及其中的榴辉岩、蛇纹石化橄榄岩和少量大理岩(图1)。在沿青藏公路的沙柳河剖面中,三类榴辉岩(蓝晶石榴辉岩、绿帘石榴辉岩和多硅白云母榴辉岩)和蛇纹石化橄榄岩构成了从地幔橄榄岩-堆晶辉长岩-洋中脊玄武岩的一个似蛇绿岩组合(张贵宾等, 2005a; Zhang *et al.*, 2008, 2009b, 2013),且其中保存有异剥钙榴岩(张贵宾和张立飞, 2011)。花岗质和泥质两类片麻岩作为榴辉岩的围岩,占据了整个柴北缘超高压变质带出露面积的 80% 左右(图1)。本文中的副片麻岩样品 12DL-06 采自沙柳河剖面的南端,主要矿物组合为  $\text{Qtz} + \text{Mu} + \text{Bt} + \text{Crt} + \text{Rt} \pm \text{Kfs} \pm \text{Pl} \pm \text{Ky}$ (图2),石榴石呈细小颗粒( $< 0.3\text{mm}$ )与长石石英等其它矿物共生。

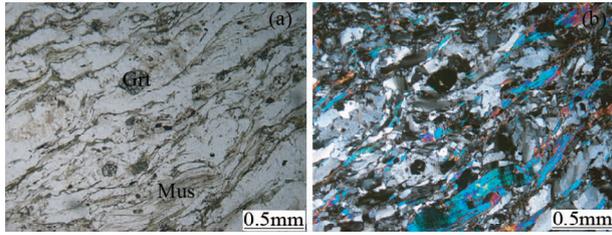


图2 副片麻岩样品 12DL-06 的显微镜照片

Fig.2 Microphotographs showing the occurrence of rutile in para-gneiss

## 2 分析方法

岩石标本清洗后被粉碎,先用重液和磁选将锆石和金红石分离出来,然后在双目镜下进行手工挑选。将挑选出的锆石颗粒和锆石标样 (Plešovice, Sláma *et al.*, 2008); 金红石和金红石标样 (DXK,  $1779 \pm 10$  Ma, JDX,  $509 \pm 8$  Ma, Li *et al.*, 2011) 分别粘到环氧树脂做成的 25mm 靶上,之后抛光。我们采用北京大学电镜实验室的扫描电镜 (FEI PHILIPS XL30 SFEG SEM) 对锆石的内部结构特征进行了阴极荧光检查,工作条件是 15kV、12pA,扫描时间为 2min。

锆石的 U、Th 和 Pb 以及微量元素测试工作运用了北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室的 Laser-ICP-MS, 分析过程及仪器条件与之前文献所描述相同 (Gou *et al.*, 2012)。分析束斑的直径为  $32\mu\text{m}$ , 每分析 5 个样品点后,扫描一次 Plešovice 标准锆石 (Sláma *et al.*, 2008), 用于 U-Pb 校正,同时将 Qinghu 标准锆石 ( $159.45 \pm 0.16$  Ma; Li *et al.*, 2009) 用做监测样品。微量元素数据采用 NIST610 玻璃作为外标,数值采用 Pearce *et al.* (1997) 中的结果, $^{29}\text{Si}$  作为内标。

金红石的 U、Th 和 Pb 年龄测试运用中国科学院地质与

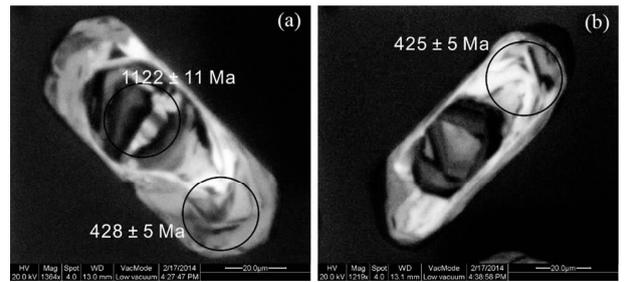


图3 副片麻岩样品中锆石的阴极荧光照片

Fig.3 Cathodoluminescence (CL) images illustrating the zircon internal structures

地球物理研究所离子探针中心的 CAMECA IMS1280 进行。仪器工作条件和测试程序遵循前人报道 (Li *et al.*, 2011), 每个分析点年龄测定的扫描次数为 10 次,约 15min。每分析 3~4 个待测样品点后,扫描一次 DXK 标准金红石,用于 Pb/U 分馏校正。年龄数据处理及投图采用 ISOPLOT 3.25 (Ludwig, 2003) 完成。金红石中的 Zr 含量同锆石相同,运用北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室的 LA-ICP-MS 进行了测试。采用 NIST610 玻璃作为外标,数值采用 Pearce *et al.* (1997) 中的结果, $^{49}\text{Ti}$  作为内标。

## 3 结果

### 3.1 锆石 U-Pb 和 Ti-in-zircon 温度计算

锆石颗粒多呈自形长柱状晶体,宽  $30 \sim 40\mu\text{m}$ ,长  $80 \sim 200\mu\text{m}$  (图 3)。阴极荧光图像分析显示这些锆石具碎屑锆石特征,核部保留有部分继承锆石,边部部分具有变质锆石特征 (图 3)。核部保留了较老的继承年龄 (图 3 和图 4,  $>700$  Ma), 且具有较高的 Th/U 比值 ( $0.15 \sim 0.48$ , 表 1)。8 个

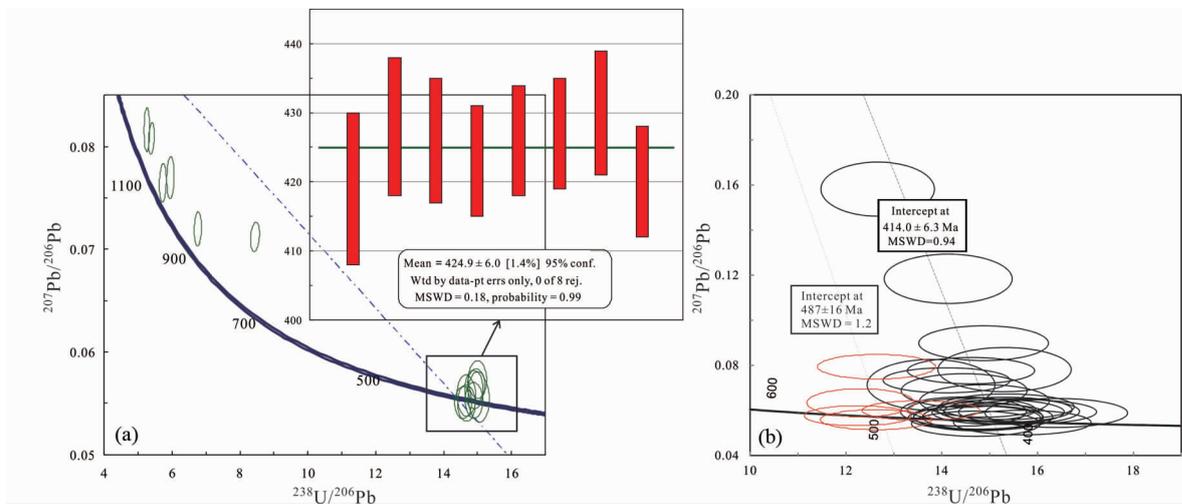


图4 锆石 (a) 和金红石 (b) 的 U-Pb 年代图解

Fig.4 Tera-Wasserburg concordia diagram showing results of zircon (a) and rutile (b) U-Pb data (data-point error ellipses are  $2\sigma$ )

表1 副片麻岩样品的 U、Th、Pb 和 Ti Laser-ICP-MS 分析结果及锆石 Ti 含量温度计的计算结果

Table 1 U, Th, Pb and Ti LA-ICP-MS zircon data and  $T_{\text{Ti-in-zircon}}$  thermometry calculations for paragneiss from North Qaidam

UHPM belt

Spot No.	位置	U Th		Isotopic ratios						Age (Ma)		Ti	$T_{\text{Ti-in-zircon}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\pm 1\sigma$		
		( $\times 10^{-6}$ )		Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$				$\pm 1\sigma$	
12DL06-07	rim	244	94	0.011	0.05561	0.00201	0.5102	0.01704	0.06654	0.00091	415	5	5.47	0.93	692	13
12DL06-42	rim	295	234	0.004	0.05635	0.00146	0.52151	0.01308	0.06715	0.00081	419	5	4.20	0.67	670	12
12DL06-43	rim	346	146	0.007	0.05503	0.0014	0.51722	0.01269	0.06818	0.00081	425	5	4.86	0.75	682	12
12DL06-52	rim	337	124	0.008	0.05509	0.00123	0.52099	0.01125	0.06861	0.00077	428	5	4.92	0.8	683	13
12DL06-64	rim	467	86	0.012	0.05676	0.00128	0.52322	0.01137	0.06688	0.00076	417	5	4.38	0.75	674	13
12DL06-67	rim	315	88	0.011	0.05734	0.00145	0.52705	0.01284	0.06669	0.00079	416	5	4.54	0.64	677	11
12DL06-71	rim	238	43	0.023	0.0553	0.00139	0.51187	0.01245	0.06715	0.00078	419	5	5.50	0.79	693	11
12DL06-102	rim	291	34	0.029	0.05576	0.00159	0.52404	0.01445	0.06818	0.00085	425	5	7.10	0.74	715	9
12DL06-28	core	163	341	0.48	0.0765	0.00149	1.84132	0.0346	0.17462	0.00203	1038	11				
12DL06-41	core	125	600	0.21	0.06196	0.0015	0.98479	0.02154	0.11527	0.00119	703	7				
12DL06-56	core	92	607	0.15	0.07199	0.00145	1.46893	0.02559	0.14799	0.00151	890	8				
12DL06-77	core	135	562	0.24	0.08166	0.00182	2.14126	0.04231	0.19018	0.00197	1122	11				
12DL06-84	core	494	947	0.52	0.08081	0.0012	2.06523	0.02945	0.18542	0.00188	1097	10				
12DL06-88	core	60	259	0.23	0.07701	0.00162	1.78344	0.03625	0.16802	0.00199	1001	11				

边部锆石给出的加权平均年龄为  $425 \pm 6\text{Ma}$  (图 3, 图 4a), 并具有极低的 Th/U 比值 ( $< 0.03$ , 表 1)。微量元素分析表明, 这 8 个锆石边部中的 Ti 含量介于  $4.2 \times 10^{-6} \sim 7.1 \times 10^{-6}$  之间 (表 1)。运用锆石中的 Ti 含量温度计 (Ti-in-zircon thermometry, Ferry and Watson, 2007) 所计算的温度加权平均值为  $689 \pm 14^{\circ}\text{C}$  (图 5a)。

### 3.2 金红石 U-Pb 和 Zr-in-rutile 温度计算

金红石颗粒的直径为  $60 \sim 140\mu\text{m}$ 。我们分析了其中的 28 个颗粒, 它们的 U 含量较高, 为  $19 \times 10^{-6} \sim 31 \times 10^{-6}$ 。在 Tera-Wasserburg 图解中, 这些数据点的回归下交点年龄为  $487 \pm 16\text{Ma}$  (MSWD = 1.2) 和  $414.0 \pm 6.3\text{Ma}$  (MSWD = 0.94) (图 4b)。对这些金红石的原位微量元素分析得到其 Zr 含量为  $84 \times 10^{-6} \sim 248 \times 10^{-6}$  (表 2)。运用金红石的 Zr 含量温度计进行温度计算时需要进行压力校正 (Tomkins *et al.*, 2007), 但对于此样品很难确定其经历过的真实压力。与沙柳河剖面相距不远的北带泥质片麻岩含有柯石英包裹体, 所以我们采用柯石英的大致下限压力值  $2.7\text{GPa}$  用于本样品的计算, 得到这些金红石 Zr 含量温度的加权平均值为  $685 \pm 9^{\circ}\text{C}$  (表 2, 图 5b)。

## 4 讨论和结论

锆石作为非常稳定的副矿物, 其具有较高的 U-Pb 封闭温度 ( $> 900^{\circ}\text{C}$ , Cherniak and Watson, 2001), 因此其 U-Pb 定年得到了广泛应用。同时锆石的 Ti 含量温度计一经推出也吸引了很多学者的兴趣, 特别是对于变质岩, 可以运用锆石同时限定寄主岩石的变质时代和对应的变质温度 (Rubatto *et*

*al.*, 1999, 2002; Rubatto and Hermann, 2007; Zheng *et al.*, 2011)。柴北缘超高压变质带中副片麻岩的变质时代较一致, 主要集中在  $430\text{Ma}$  左右 (详见 Zhang *et al.*, 2013; Song *et al.*, 2014 及其中的参考文献), 其中都兰北带副片麻岩中的含柯石英锆石的原位定年表明其变质时代为  $423 \pm 6\text{Ma}$  (Song *et al.*, 2006)。本文中副片麻岩样品中的锆石尽管没有确切的超高压变质矿物发现, 但结合其边部的变质重结晶特征, 极低的 Th/U 比值和类似的年龄 ( $425 \pm 6\text{Ma}$ , 图 4a), 表明其可能也经历了同期的高压或者超高压变质作用。运用锆石的钛含量温度计所计算出的温度  $689 \pm 14^{\circ}\text{C}$  (图 5a) 应代表了同期的变质作用温度。

金红石 U-Pb 定年作为很有效的手段, 可以用来限定变质岩的冷却历史 (Mezger *et al.*, 1989; Li *et al.*, 2003; Kooijman *et al.*, 2010)。同时金红石的 Zr 含量温度计可以被广泛应用于变泥质岩、变基性岩和其中的碎屑金红石 (Zack and Luvizotto, 2006; Triebold *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2010a; Jiao *et al.*, 2011; Meinhold *et al.*, 2008; Morton and Chenery, 2009)。同锆石类似, 理论上金红石可以同时提供温度和时代信息。但要解释金红石所给出的温度和时代之间的关联性则要明确金红石中 Zr 的扩散及 U-Pb 体系的封闭温度。对于金红石中的锆含量温度计所计算出的温度结果的意义, 已有一些相应的研究 (Ewing *et al.*, 2013)。尽管之前有研究表明大别苏鲁榴辉岩中的金红石 (尤其是粒间基质金红石) 很难保存变质峰期温度 (Chen and Li, 2008)。但对于新鲜榴辉岩中的金红石系统研究表明, 其可以保留峰期阶段的 Zr 含量, 也即能记录峰期变质阶段的温度信息 (Zhang *et al.*, 2010a)。同时, 实验表明元素 Zr 在金红石中的扩散速率较慢 (Cherniak *et al.*, 2007)。本文样品 12DL-06

表 2 副片麻岩样品金红石的 CAMECA IMS 1280 U-Pb 分析数据、Laser-ICP-MS Zr 元素含量分析数据及金红石锆含量温度计计算结果

Table 2 Rutile U-Pb data analyzed by Cameca IMS 1280 ion microprobe, Zr contents Laser-ICP-MS analysis and  $T_{\text{Zr-in-rutile}}$  thermometry calculations for paragneiss from North Qaidam UHPM belt

Spot No.	U <sup>a</sup> ( $\times 10^{-6}$ )	$\frac{^{238}\text{U}\#}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma^b$ (%)	$\frac{^{207}\text{Pb}\#}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$ (%)	$t_{206/238}^*$ (Ma)	$\pm 1\sigma$ (Ma)	Zr ( $\times 10^{-6}$ )	$\pm 1\sigma$	$T_{\text{Zr-in-rutile}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\pm 1\sigma$
12DL-06@1	31	16.390	3.71	0.05887	4.46	379.6	13.9	186	7	693	6
12DL-06@3	30	15.311	3.71	0.07809	5.13	396.3	14.6	127	4	662	5
12DL-06@4	28	14.611	3.71	0.07762	3.07	415.2	15.2	146	5	673	5
12DL-06@5	24	12.317	3.72	0.06303	4.04	499.7	18.3	171	6	685	6
12DL-06@6	25	14.135	3.86	0.11836	3.78	407.0	15.6	233	8	711	6
12DL-06@8	30	14.957	3.72	0.05710	4.15	416.2	15.2	216	8	705	6
12DL-06@9	28	15.791	3.73	0.05934	3.65	393.5	14.4	153	5	677	5
12DL-06@10	25	14.874	3.72	0.08981	3.51	401.7	14.7	201	7	699	6
12DL-06@11	23	12.639	3.76	0.05547	3.27	491.8	18.1	155	5	678	5
12DL-06@12	26	14.625	3.73	0.06034	3.46	423.8	15.5	237	8	713	6
12DL-06@13	24	15.312	3.76	0.06032	3.74	405.1	15.0	192	7	695	6
12DL-06@14	21	12.256	3.73	0.05725	3.14	505.7	18.5	128	4	663	5
12DL-06@15	28	14.101	3.84	0.07334	3.09	432.2	16.3	141	5	670	5
12DL-06@16	26	15.459	3.74	0.05952	3.87	401.7	14.8	219	8	706	6
12DL-06@17	25	13.576	3.71	0.05958	2.98	456.2	16.6	168	6	684	6
12DL-06@18	27	15.360	3.74	0.06161	3.75	403.2	14.8	202	7	699	6
12DL-06@19	23	15.682	3.74	0.05461	4.07	398.5	14.7	227	8	709	6
12DL-06@20	26	14.713	3.73	0.05409	4.21	424.5	15.6	248	9	717	6
12DL-06@21	22	12.647	3.99	0.07902	2.82	477.4	18.7	248	9	717	6
12DL-06@22	26	15.177	3.72	0.05927	3.78	409.2	15.0	241	8	714	6
12DL-06@23	22	14.892	3.71	0.06420	4.58	414.3	15.2	108	4	650	5
12DL-06@24	19	14.468	3.71	0.06883	4.42	423.8	15.5	154	5	677	6
12DL-06@25	26	12.664	3.82	0.15814	3.10	429.4	16.4	206	7	701	6
12DL-06@26	27	14.760	3.71	0.05727	4.54	421.6	15.4	217	8	706	6
12DL-06@27	23	13.776	3.96	0.07131	6.46	443.3	17.4	190	7	694	6
12DL-06@28	30	14.683	3.84	0.05672	3.80	424.0	16.0	84	3	632	5
12DL-06@29	30	14.766	3.75	0.05694	3.78	421.5	15.5	190	7	694	6
12DL-06@30	24	14.452	3.71	0.05948	4.45	429.2	15.7	150	5	675	6

注:  $t_{206/238}^*$  is  $^{206}\text{Pb}$ - $^{238}\text{U}$  age calculated by  $^{207}\text{Pb}$ -based common-lead correction; #: The ratios are common Pb uncorrected, used for Tera-Wasserburg plot; a: Error of U concentrations is  $\pm 50\%$  estimated by U<sup>+</sup> yield of JDX standard rutile; b: Error assigned to the ratio is one sigma estimated by counting statistics and calibration

中的金红石温度计给出了与锆石温度计基本一致的约 690 $^{\circ}\text{C}$  的温度,表明金红石中的 Zr 含量保留了副片麻岩可能经历的峰期变质条件下的特征。

U-Pb 在金红石中的封闭温度决定于金红石本身的粒度及冷却速率 (Mezger *et al.*, 1991; Cherniak, 2000)。早期根据区域地质对缓慢冷却地体中含金红石样品的研究,表明其 U-Pb 封闭温度大致在 400 ~ 500 $^{\circ}\text{C}$  之间 (Mezger *et al.*, 1989)。而实验表明对于粒度为 100 $\mu\text{m}$  的天然以及合成金红石,在干体系下封闭温度可达到 600 $^{\circ}\text{C}$ ,而湿体系下会更高 (Cherniak, 2000; Vry and Backer, 2006)。最近, Kooijman *et al.* (2010) 的研究表明即使是较小粒径的金红石颗粒,也很难给出一个确定的封闭温度值。他们运用 Laser-ICP-MS 分析发现,对于一颗 280 $\mu\text{m}$  直径的金红石,其封闭温度从核部的 640 $^{\circ}\text{C}$  递减到边部的约 490 $^{\circ}\text{C}$ ; 同时对于粒径在 120 ~

270 $\mu\text{m}$  范围内的金红石其平均值为 569  $\pm$  24 $^{\circ}\text{C}$ 。对于本文样品中的金红石多数小于 120 $\mu\text{m}$ ,因此其封闭温度应小于此平均值。但真实值很难确定,因此本文仍采用 Kooijman *et al.* (2010) 文中的推荐平均值 (569  $\pm$  24 $^{\circ}\text{C}$ )。金红石 U-Pb 图解给出两个下交点年龄,其中较老的年龄 487  $\pm$  16Ma 可能代表了金红石开始结晶的年龄,也即进变质过程中的生长记录。因为本研究中的金红石是从岩石中分选出的单颗粒,其原位的产状信息不清楚,可能部分早期生长的金红石被包裹在某些单矿物中,使得其没有被重置。而大部分基质中的金红石则只记录了较年轻的冷却年龄 (414.0  $\pm$  6.3Ma), 应代表了样品经历过约 430Ma 时的峰期变质温度约为 690 $^{\circ}\text{C}$  的可能深俯冲后,折返冷却到约 570 $^{\circ}\text{C}$  的时代。

据此,采用锆石所确定的变质时代和峰期温度以及金红石所确定的冷却年龄和对应的可能封闭温度值,我们可以计

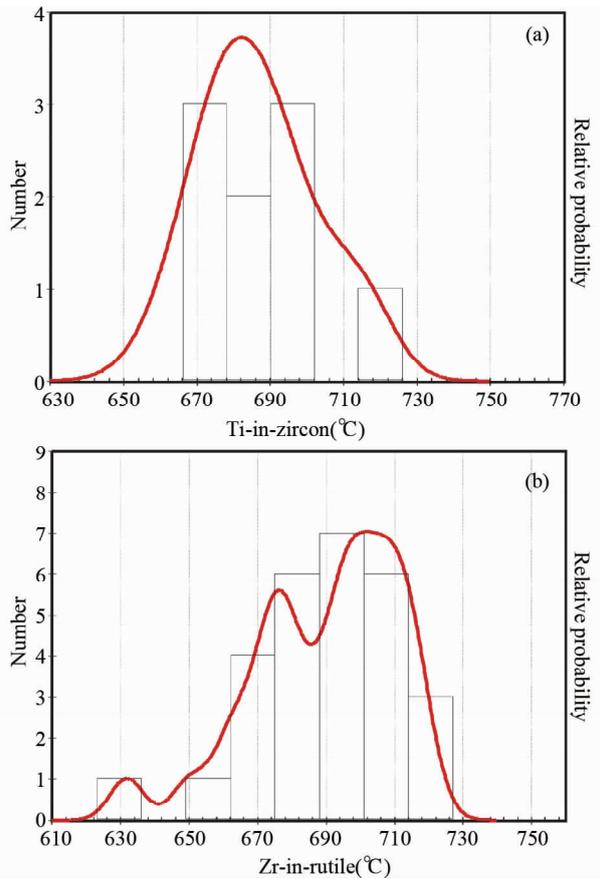


图5 副片麻岩样品 12DL-06 中锆石 Ti 含量温度计计算结果 (a) 和金红石 Zr 含量温度计计算结果 (b) 概率密度分布图

Fig. 5 Probability density plots of zircon  $T_{\text{Ti-in-zircon}}$  (a) and rutile  $T_{\text{Zr-in-rutile}}$  (b) results for paragneiss 12DL-06 from North Qaidam UHPM belt

Temperature peaks are calculated using the un-mix function of Isoplot for Microsoft Excel (Ludwig, 2003)

算出此样品的  $T-t$  轨迹 (图 6)。相应的我们可以估算出冷却速率约为  $11^\circ\text{C}/\text{Myr}$ 。Zhang *et al.* (2005b) 对鱼卡和锡铁山的榴辉岩运用锆石 U-Pb 和角闪石、云母  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  定年进行了详细研究,但由于其采用了单颗粒锆石 TIMS 定年方法,对鱼卡榴辉岩所确定出来的榴辉岩相变质时代较老(鱼卡:  $486 \sim 488\text{Ma}$ ; 锡铁山),而 Chen *et al.* (2009) 采用原位定年方法给出了较一致的约  $430\text{Ma}$  的时代。相应的较老的角闪石和白云母  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  定年结果 ( $477 \pm 8\text{Ma}$  和  $466 \pm 5\text{Ma}$ ) 可能源于类似于大别山和天山榴辉岩样品中的过剩氩的存在 (Li *et al.*, 1994; Su *et al.*, 2010)。而锡铁山榴辉岩角闪石  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  年龄为  $407 \pm 4\text{Ma}$ , 结合其 Sm-Nd 全岩加单矿物等时线给出的  $435 \pm 49\text{Ma}$ , 限定出其较慢的  $3 \sim 4^\circ\text{C}/\text{Myr}$  冷却速率 (Zhang *et al.*, 2005b)。

最近针对柴北缘超高压变质带中鱼卡和都兰北带两个地区的新鲜榴辉岩中的金红石定年结果显示,其 U-Pb 年龄

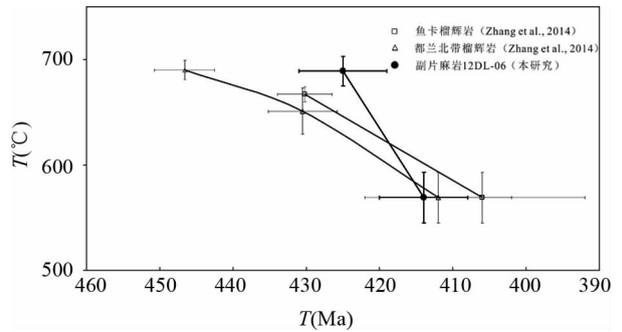


图6 由锆石和金红石年代及温度信息所导出的副片麻岩  $T-t$  轨迹 (其中鱼卡和都兰北带榴辉岩的数据据 Zhang *et al.*, 2014)

Fig. 6  $T-t$  paths of paragneiss sample 12DL-06 in the North Qaidam UHPM belt (data of Yuka and North Dulan eclogite are from Zhang *et al.*, 2014)

也集中在与副片麻岩相同的约  $410\text{Ma}$  左右 (Zhang *et al.*, 2014),所以在误差范围内此带中的副片麻岩和榴辉岩经历了类似的折返过程和较慢的冷却速率 (图 6)。同大别苏鲁超高压变质带中较快的折返速率 ( $20^\circ\text{C}/\text{Myr}$ , Li *et al.*, 2003) 相比,此带中较慢的冷却速率也导致榴辉岩和围岩片麻岩中所保留下来的柯石英等超高压变质作用的证据极少。

**致谢** 感谢马芳博士协助本文中对锆石的分析;对李秋立研究员协助本文中的金红石定年工作并审阅本文和陈振宇博士审阅本文并提出建设性修改意见表示感谢。

## References

- Chen DL, Liu L, Sun Y and Liou JG. 2009. Geochemistry and zircon U-Pb dating and its implications of the Yukahe HP/UHP terrane, the North Qaidam, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(3-4): 259-272
- Chen ZY and Li QL. 2008. Zr-in-rutile thermometry in eclogite at Jinheqiao in the Dabie orogen and its geochemical implications. *Chinese Science Bulletin*, 53(5): 768-776
- Cherniak DJ. 2000. Pb diffusion in rutile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 139(2): 198-207
- Cherniak DJ and Watson EB. 2001. Pb diffusion in zircon. *Chemical Geology*, 172(1-2): 5-24
- Cherniak DJ, Manchester J and Watson EB. 2007. Zr and Hf diffusion in rutile. *Earth and Planetary Science Letters*, 261(1-2): 267-279
- Ewing TA, Hermann J and Rubatto D. 2013. The robustness of the Zr-in-rutile and Ti-in-zircon thermometers during high-temperature metamorphism (Ivrea-Verbanò Zone, northern Italy). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 165(4): 757-779
- Ferry JM and Watson EB. 2007. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154(4): 429-437
- Gou LL, Zhang LF, Tao RB and Du JX. 2012. A geochemical study of syn-subduction and post-collisional granitoids at Muzhaerte River in the Southwest Tianshan UHP belt, NW China. *Lithos*, 136-139: 201-224
- Ireland TR and Williams IS. 2003. Considerations in zircon

- geochronology by SIMS. In: Hanchar JM and Hoskin PO (eds.). Zircon: Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53 (1): 215–241
- Jiao SJ, Guo JH, Mao Q and Zhao RF. 2011. Application of Zr-in-rutile thermometry: A case study from ultrahigh-temperature granulites of the Khondalite belt, North China Craton. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 162(2): 379–393
- Kooijman E, Mezger K and Berndt J. 2010. Constraints on the U-Pb systematics of metamorphic rutile from in situ LA-ICP-MS analysis. *Earth and Planetary Science Letters*, 293(3–4): 321–330
- Li QL, Li SG, Zheng YF, Li HM, Massonne HJ and Wang QC. 2003. A high precision U-Pb age of metamorphic rutile in coesite-bearing eclogite from the Dabie Mountains in central China: A new constraint on the cooling history. *Chemical Geology*, 200(3–4): 255–265
- Li QL, Lin W, Su W, Li XH, Shi YH, Liu Y and Tang GQ. 2011. SIMS U-Pb rutile age of low-temperature eclogites from southwestern Chinese Tianshan, NW China. *Lithos*, 122(1–2): 76–86
- Li SG, Wang SS, Chen YZ, Liu DL, Qiu J, Zhou HX and Zhang ZM. 1994. Excess argon in phengite from eclogite: Evidence from dating of eclogite minerals by Sm-Nd, Rb-Sr and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  methods. *Chemical Geology*, 112(3–4): 343–350
- 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(4): 1525–2027
- Liu XC, Wu YB, Gao S, Liu Q, Wang H, Qin ZW, Li QL, Li XH and Gong HJ. 2012. First record and timing of UHP metamorphism from zircon in the Xitieshan terrane: Implications for the evolution of the entire North Qaidam metamorphic belt. *American Mineralogist*, 97(7): 1083–1093
- Ludwig KR. 2003. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley, 4: 70
- Meinhold G, Anders B, Kostopoulos D and Reischmann T. 2008. Rutile chemistry and thermometry as provenance indicator: An example from Chios Island, Greece. *Sedimentary Geology*, 203(1–2): 98–111
- Meinhold G. 2010. Rutile and its applications in Earth sciences. *Earth-Science Reviews*, 102(1–2): 1–28
- Mezger K, Hanson GN and Bohlen SR. 1989. High-precision U-Pb ages of metamorphic rutiles: Application to the cooling history of high-grade terranes. *Earth and Planetary Science Letters*, 96(1–2): 106–118
- Mezger K, Rawnsley CM, Bohlen SR and Hanson GN. 1991. U-Pb garnet, sphene, monazite, and rutile ages: Implications for the duration of high-grade metamorphism and cooling histories, Adirondack Mts., New York. *The Journal of Geology*, 99(3): 415–428
- Morton A and Chenery S. 2009. Detrital rutile geochemistry and thermometry as guides to provenance of Jurassic-Paleocene sandstones of the Norwegian Sea. *Journal of Sedimentary Research*, 79(7): 540–553
- Pearce NJG, Perkins WT, Westgate JA, Gorton MP, Jackson SE, Neal CR and Chenery SP. 1997. A compilation of new and published major and trace element data for NIST SRM 610 and NIST SRM 612 glass reference materials. *Geostandards Newsletter*, 21(1): 115–144
- Rubatto D, Gebauer D and Compagnoni R. 1999. Dating of eclogite-facies zircons: The age of Alpine metamorphism in the Sesia-Lanzo Zone (Western Alps). *Earth and Planetary Science Letters*, 167(3–4): 141–158
- Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. *Chemical Geology*, 184(1–2): 123–138
- Rubatto D and Hermann J. 2007. Zircon behaviour in deeply subducted rocks. *Elements*, 3(1): 31–35
- Sláma J, Košler J, Condon DJ, Crowley JL, Gerdes A, Hanchar JM, Horstwood MSA, Morris GA, Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U, Schoene B, Tubrett MN and Whitehouse MJ. 2008. Plešovice zircon-A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249(1–2): 1–35
- Song SG, Yang JS, Liou JG, Wu CL, Shi RD and Xu ZQ. 2003a. Petrology, geochemistry and isotopic ages of eclogites from the Dulan UHPM terrane, the North Qaidam, NW China. *Lithos*, 70(3–4): 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(6): 631–644
- 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, Northern Tibetan Plateau: A record of complex histories from oceanic lithosphere subduction to continental collision. *Earth and Planetary Science Letters*, 234(1–2): 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 from the Northern Tibetan Plateau based on geochemical and geochronological data. *Journal of Petrology*, 47(3): 435–455
- Song SG, Niu YL, Su L, Zhang C and Zhang LF. 2014. Continental orogenesis from ocean subduction, continent collision/subduction, to orogen collapse, and orogen recycling: The example of the North Qaidam UHPM belt, NW China. *Earth-Science Reviews*, 129: 59–84
- Su W, Gao J, Klemd R, Li JL, Zhang X, Li XH, Chen NS and Zhang L. 2010. U-Pb zircon geochronology of Tianshan eclogites in NW China: Implication for the collision between the Yili and Tarim blocks of the southwestern Altai. *European Journal of Mineralogy*, 22(4): 473–478
- Tomkins HS, Powell R and Ellis DJ. 2007. The pressure dependence of the zirconium-in-rutile thermometer. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(6): 703–713
- Triebold S, von Eynatten H, Luvizotto GL and Zack T. 2007. Deducing source rock lithology from detrital rutile geochemistry: An example from the Erzgebirge, Germany. *Chemical Geology*, 244(3–4): 421–436
- Vry JK and Baker JA. 2006. LA-MC-ICPMS Pb-Pb dating of rutile from slowly cooled granulites: Confirmation of the high closure temperature for Pb diffusion in rutile. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(7): 1807–1820
- Yang JS, Xu ZQ, Song SG, Zhang JX, Wu CL, Shi RD, Li HB and Maurice B. 2001. Discovery of coesite in the North Qaidam Early Palaeozoic ultrahigh pressure (UHP) metamorphic belt, NW China. *Earth and Planetary Science Letters*, 333(11): 719–724
- Yang JS, Xu ZQ, Zhang JX, Song SG, Wu CL, Shi RD, Li HB and Maurice B. 2002. Early Palaeozoic North Qaidam UHP metamorphic belt on the north-eastern Tibetan Plateau and a paired subduction model. *Terra Nova*, 14(5): 397–404
- Yang JS, Zhang JX, Meng FC *et al.* 2003. Ultrahigh pressure eclogites of the North Qaidam and Altun mountains, NW China and their protoliths. *Earth Science Frontiers*, 77(4): 291–314 (in Chinese with English abstract)
- Zack T and Luvizotto GL. 2006. Application of rutile thermometry to eclogites. *Mineralogy and Petrology*, 88(1–2): 69–85
- Zhang GB, Song SG, Zhang LF *et al.* 2005. Ophiolite-type mantle peridotite from Shaluhe, North Qaidam UHPM belt, NW China and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4): 1049–1058 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GB, Song SG, Zhang LF and Niu YL. 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(1–4): 99–118
- Zhang GB, Ellis DJ, Christy AG, Zhang LF, Niu YL and Song SG. 2009a. UHP metamorphic evolution of coesite-bearing eclogite from the Yuka terrane, North Qaidam UHPM belt, NW China. *European Journal of Mineralogy*, 21: 1287–1300

- Zhang GB, Zhang LF, Song SG and Niu YL. 2009b. UHP metamorphic evolution and SHRIMP geochronology of a coesite-bearing meta-ophiolitic gabbro in the North Qaidam, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(3-4): 310-322
- Zhang GB, Ellis DJ, Christy AG, Zhang LF and Song SG. 2010a. Zr-in-rutile thermometry in HP/UHP eclogites from western China. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(3): 427-439
- Zhang GB and Zhang LF. 2011. Rodingite from oceanic lithology of Shaliuhe terrane in North Qaidam UHPM belt and its geological implication. *Earth Science Frontiers*, 18(2): 151-157 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GB, Zhang LF and Christy AG. 2013. From oceanic subduction to continental collision: An overview of HP-UHP metamorphic rocks in the North Qaidam UHP belt, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 63: 98-111
- Zhang GB, Zhang LF, Christy AG, Song SG and Li QL. 2014. Differential exhumation and cooling history of North Qaidam UHP metamorphic rocks, NW China: Constraints from zircon and rutile thermometry and U-Pb geochronology. *Lithos*, 205: 15-27
- 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(1-2): 51-76
- Zhang JX, Meng FC, Li JP and Mattinson CG. 2009c. Coesite in eclogite from the North Qaidam Mountains and its implications. *Chinese*

*Science Bulletin*, 54(6): 1105-1110

- Zhang JX, Mattinson CG, Yu SY, Li JP and Meng FC. 2010b. U-Pb zircon geochronology of coesite-bearing eclogites from the southern Dulan area of the North Qaidam UHP terrane, northwestern China: Spatially and temporally extensive UHP metamorphism during continental subduction. *Journal of Metamorphic Geology*, 28(9): 955-978
- Zheng YF, Gao XY, Chen RX and Gao TS. 2011. Zr-in-rutile thermometry of eclogite in the Dabie orogen: Constraints on rutile growth during continental subduction-zone metamorphism. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(2): 427-451

#### 附中文参考文献

- 杨经绥, 张建新, 孟繁聪等. 2003. 中国西部柴北缘-阿尔金的超高压变质榴辉岩及其原岩性质探讨. *地学前缘*, 77(4): 291-314
- 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榄岩的发现及其意义. *岩石学报*, 21(4): 1049-1058
- 张贵宾, 张立飞. 2011. 柴北缘沙柳河地区洋壳超高压变质单元中的异剥钙榴岩的发现及其地质意义. *地学前缘*, 18(2): 151-157