

柴北缘超高压变质带都兰地区的构造演化历史 ——来自片麻岩独居石原位电子探针定年的证据

张 聪^{1,2}, 张立飞², 张贵宾², 陈 梅³, 黄 杰³

(1. 中国地质科学院 地质研究所, 大陆构造与动力学国家重点实验室, 北京 100037; 2. 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; 3. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘 要: 榴辉岩及其围岩的变质作用和年代学研究是揭示超高压变质地体形成机制及演化过程的关键, 但是作为榴辉岩围岩的副片麻岩, 由于其矿物组合相对简单, 缺少指示温压条件的特征矿物, 不容易将其岩石学特征与变质年龄相联系。本文对柴北缘超高压变质带都兰地区 3 个含石榴石副片麻岩样品进行了岩石学及独居石电子探针原位 U-Th-Pb 化学法定年研究, 获得 3 个样品中独居石的表面年龄分别为 433 ± 15.4 Ma (8S01, 沙柳河剖面), 440 ± 11.2 Ma (8S55, 都兰北带野马滩) 和 435 ± 14.7 Ma (8S116, 都兰南带)。其中沙柳河及都兰南带的两个样品年龄相似, 与北带样品约有 5 Ma 的年龄差。3 个测试样品中的独居石均表现为富集轻稀土元素, 重稀土元素严重亏损, 具有 Eu 的正异常, 其中 Eu/Eu^* 与寄主岩石石榴石中 Ca 含量存在耦合关系。岩石学研究及温压条件计算表明独居石为角闪岩相退变过程中变质重结晶生长而成。都兰南带独居石样品测试点年龄介于 440~430 Ma 时具有较高的 Y 含量, 且 Y 与 Eu/Eu^* 之间存在明显的负相关性, 表明 440~430 Ma 之间都兰地区部分副片麻岩经历了角闪岩相退变质作用。

关键词: 副片麻岩, 独居石电子探针化学定年, 柴北缘超高压变质带, 都兰地体

中图分类号: P588.34⁺5; P597⁺.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-6524(2013)06-1037-20

The tectonic evolution of the Dulan terrane, North Qaidam UHP metamorphic belt: evidence from in-situ EMP monazite dating of paragneiss

ZHANG Cong^{1,2}, ZHANG Li-fei², ZHANG Gui-bin², CHEN Mei³ and HUANG Jie³

(1. Institute of Geology, CAGS; State Key Laboratory of Continental Tectonics and Dynamics, Beijing 100037, China; 2. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, MOE; School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China; 3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The metamorphism and age of UHP eclogites and their country rocks constitute the key to understanding the formation and evolution of the UHP metamorphic terranes. However, because of simple mineral assemblages and lack of *P-T* sensitive minerals, it is difficult to relate the petrological characteristics with the metamorphic ages of the country rock paragneiss. This paper focused on the petrology and in-situ electronic microprobe monazite U-Th-total Pb dating of three paragneiss samples from Dulan terrane in North Qaidam UHP metamorphic belt. As a result, ages of 433 ± 15.4 Ma (8S01 from Shaliuhe cross-section), 440 ± 11.2 Ma (8S55 from Yematan in North Dulan) and 435 ± 14.7 Ma (8S116 from South Dulan) were obtained respectively. Monazites in paragneiss from Shaliuhe section and South Dulan yielded similar ages, which are different from ages of samples from North Dulan by about 5 Ma. The analyses of the three monazite samples from the Dulan

收稿日期: 2013-10-10; 修订日期: 2013-10-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41202034, 41310104002, 41172196); 中国博士后特别基金资助项目(2013T60030)

作者简介: 张 聪(1983-), 博士, 助理研究员, 从事超高压变质岩石学、造山带演化研究, E-mail: congzhang@pku.edu.cn

terrane show that they are enriched in LREE and lack of HREE, characterized by positive Eu anomaly. The Eu/Eu^* ratios of monazite have coupling relationship with Ca content in garnet in the matrix. In combination with petrological investigation, P - T calculation and monazite microprobe analysis, the authors hold that the monazite in this study grew or recrystallized under the amphibolite facies metamorphic conditions during retrogression. The monazite analyses with ages from 440 Ma to 430 Ma in paragneiss from South Dulan are characterized by relatively high Y content. Furthermore, the Y content has an obvious negative correlation with Eu/Eu^* , suggesting that part of the paragneiss in Dulan terrane had experienced amphibolite facies metamorphism during 440 ~ 430 Ma.

Key words: paragneiss; electronic microprobe monazite chemical dating; North Qaidam UHP metamorphic belt; Dulan terrane

高压-超高压变质带是古板块汇聚边界的重要标志,记录了洋壳或陆壳物质由俯冲发生超高压变质作用到折返的一系列动力学过程(Carswell, 1990; Coleman and Wang, 1995; Ernst and Liou, 1995; Maruyama *et al.*, 1996; Wang and Cong, 1996; Ernst, 2001; Song *et al.*, 2006; Liou *et al.*, 2007)。自从在西阿尔卑斯 Dora Maria 地块(Chopin, 1984)和挪威西片麻岩地区(Western Gneiss Region, WGR, Smith, 1984)发现超高压指示性矿物柯石英以来,高压-超高压变质作用研究逐渐成为地质学研究领域的热点,并在推动大陆动力学研究过程中取得了突破性进展。榴辉岩作为超高压变质带中包含有丰富的动力学信息的重要岩石类型得到了广泛而深入的研究。通过对榴辉岩中副矿物锆石的年代学研究,前人对目前已发现的全球 25 个超高压变质地体进行了定年工作(如 Liou *et al.*, 2004, 2009 及其引文)。利用锆石中的特定包裹体结合测试年龄,确定不同变质阶段的年龄已成为榴辉岩年代研究中的常用方法,但榴辉岩围岩片麻岩中锆石的包裹体矿物相对单一,不容易对所获得的变质年龄进行解释。独居石电子探针原位 U-Th-total Pb 化学定年方法(Suzuki and Adachi, 1991)可以利用电子探针在背散射图像辅助下直接对独居石中所含的 U、Th、Pb 含量及其他组成元素进行原位无损分析,并观察独居石的显微结构及其与岩石中主要造岩矿物的关系,把独居石保存的年龄信息与岩石的变质过程联系起来,进而确定所得年龄的地质意义(如 Terry *et al.*, 2000; 刘树文等, 2004; Williams *et al.*, 2006, 2007)还可从超高压岩石围岩的角度来推测变质过程,进而建立完整的变质作用 P - T - t 轨迹。独居石电子探针化学法定年为原位确定变质矿物生长及重结晶作用时代提供了一种

高效可行的方法。

2001 年柴北缘超高压变质带东端都兰地区的副片麻岩中就有超高压指示性矿物柯石英的报道(杨经绥等, 2001; Song *et al.*, 2003a), 并得到 452 ± 14 、 419 ± 14 Ma (Yang *et al.*, 2005) 及 434 ± 7 、 423 ± 6 Ma (Song *et al.*, 2006) 的超高压变质年龄。以上测试年龄表明副片麻岩记录的超高压变质作用长达 33 Ma, 而在沙柳河剖面及都兰北带发现的其他锆石年龄范围从 426 ± 4 Ma 到 458 ± 6 Ma, 并没有明显的矿物学证据证明其所代表的变质过程(陈丹玲等, 2008; Mattinson *et al.*, 2009; Yu *et al.*, 2013)。本文通过对都兰地区 3 个含石榴石副片麻岩的岩石学研究及独居石原位电子探针定年, 利用主要矿物与独居石之间的元素耦合关系研究, 把所得独居石表面年龄与其寄主片麻岩变质阶段相联系, 为都兰地区副片麻岩的形成机制及变质过程提供年代学制约。

1 地质背景

柴北缘超高压变质带位于我国青海省, 青藏高原东北缘, 沿柴达木盆地呈 NWW-SEE 走向展布, 夹于祁连地块和柴达木地块之间, 其西端被阿尔金左旋走滑断裂所切。柴北缘超高压变质带自西向东主要分布于鱼卡、绿梁山(也称胜利口)、锡铁山及都兰 4 个区域内(图 1), 其岩石组合主要为花岗质片麻岩和泥质片麻岩。在鱼卡、锡铁山和都兰地区, 榴辉岩呈层状或透镜体形式包裹于两种片麻岩之中, 这 3 个区域的榴辉岩中均有超高压指示性矿物柯石英(杨经绥等, 2001; Song *et al.*, 2003a; Zhang G *et al.*, 2009a, 2009b; 张建新等, 2009; Liu *et al.*, 2012)。绿梁山地区的岩石组合与其他 3 个地区有

所差异,主要出露有石榴橄榄岩、石榴辉石岩及部分基性麻粒岩(杨建军等,1994; Song *et al.*, 2004, 2009; 张建新等, 2007)。该岩石组合的围岩同样为花岗质及部分含蓝晶石/矽线石泥质片麻岩。石榴

二辉橄榄岩锆石中微晶金刚石的发现及石榴石和橄榄石中的部分出溶结构证明该石榴橄榄岩同样经历了超高压变质作用(Song *et al.*, 2004, 2005a, 2005b)。

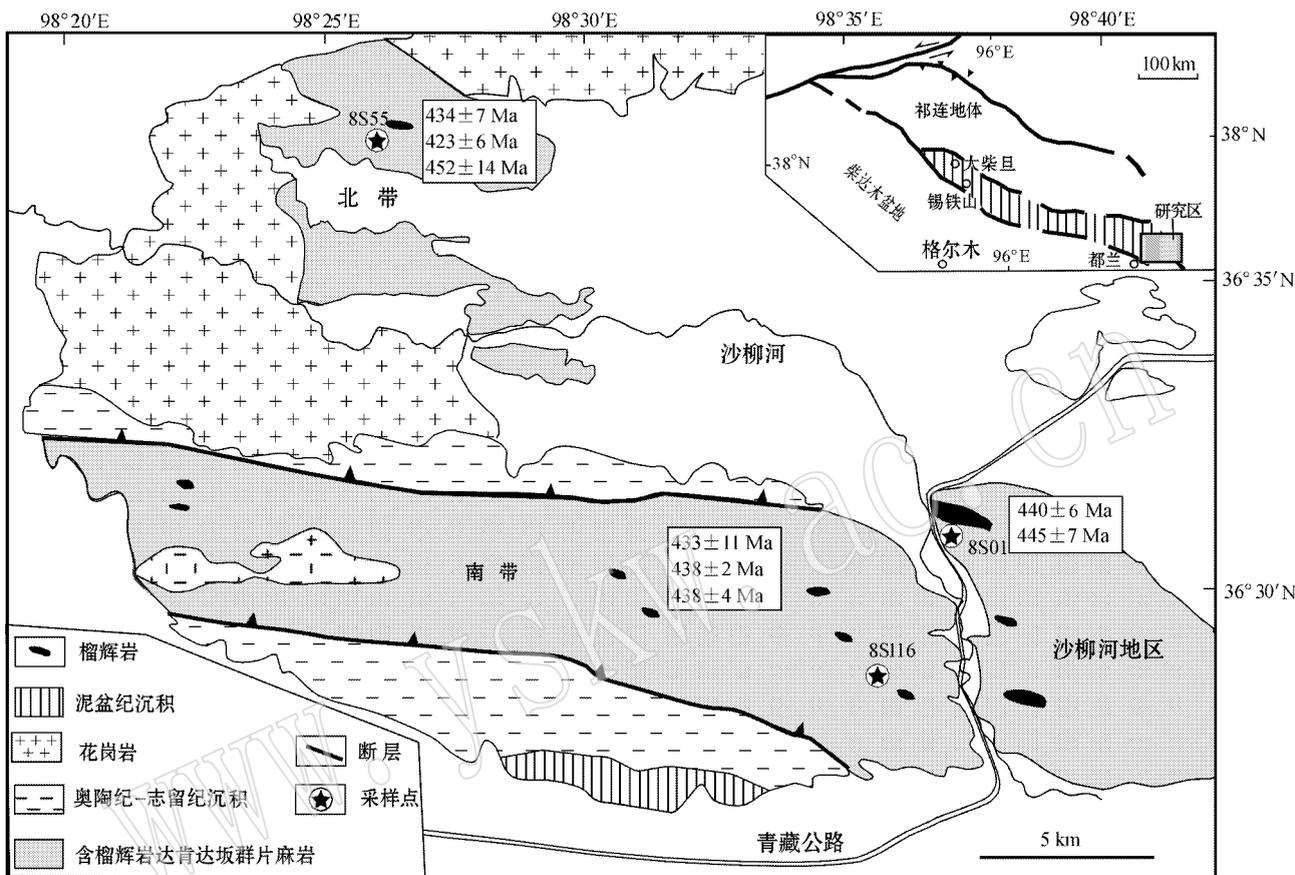


图 1 柴北缘超高压变质带都兰地区地质简图(修改自 Song *et al.*, 2003a)

Fig. 1 Sketch geological map of Dulan terrane, North Qaidam UHP metamorphic belt (modified after Song *et al.*, 2003a)

图中年龄数据为都兰地区榴辉岩及副片麻岩高压/超高压变质年龄,引自 Yang 等(2005)、Song 等(2006)、Zhang G 等(2008, 2009b)、Zhang J 等(2010)和 Yu 等(2013)

The ages shown in the map are the HP/UHP metamorphic ages of the eclogite and paragneiss from Dulan terrane, they are from Yang *et al.* (2005); Song *et al.* (2006); Zhang G *et al.* (2008, 2009b); Zhang J *et al.* (2010) and Yu *et al.* (2013)

本文研究区位于柴北缘超高压变质带东段的都兰地区。该地区由大量的花岗质片麻岩和少量泥质片麻岩组成,榴辉岩及少量蛇纹石化超基性岩呈透镜状产于片麻岩中。根据岩石组合及形成的温压条件不同,前人将都兰划分为南北两个亚带,两者之间被野马滩花岗岩分隔(Song *et al.*, 2003a, 2003b, 2006)。Zhang G 等(2008)在都兰沙柳河东部地区发现代表古洋壳残片的蛇绿岩组合,使得沙柳河地区成为一个区别于南北两带的独立区域。都兰北带榴辉岩由石榴石+绿辉石+多硅白云母+金红石±

石英组成,峰期变质温压条件为 2.9~3.2 GPa 和 631~687°C,这与石榴石中保存的多晶石英+钾长石包裹体(柯石英假像)(Song *et al.*, 2003b)及围岩锆石中发现柯石英包裹体的现象相吻合(杨经绥等, 2001; Song *et al.*, 2003a, 2003b)。都兰南带榴辉岩的峰期矿物组合为石榴石+绿辉石+蓝晶石+多硅白云母+金红石±石英/柯石英,峰期温压条件为 2.9~3.3 GPa 和 729~746°C,后期又分别经历了高压麻粒岩相及角闪岩相变质叠加(Song *et al.*, 2003b; 张建新等, 2009)。沙柳河剖面由蓝晶石榴

辉岩、多硅白云母榴辉岩、绿帘石榴辉岩和蛇纹石化的方辉橄榄岩组成。岩石学及地球化学研究表明,该岩石组合为残存的代表古洋壳的蛇绿岩,从而证明了柴北缘地区洋壳俯冲作用的存在(Song *et al.*, 2003b; Zhang G *et al.*, 2008)。

2 样品描述及其岩石学特征

本文样品分别来自都兰超高压变质带的 3 个不同地块。

样品 8S01 为含矽线石石榴石云母片麻岩,采自都兰沙柳河含榴辉岩及超基性剖面,为榴辉岩的围岩(图 2a)。岩石呈斑状变晶结构,片麻状构造,矿物组成为石榴石(10%)、白云母(20%)、石英+斜长石(70%)及少量矽线石。石榴石呈残晶形式存在,以铁铝榴石为主($\text{Prp}_{6\sim 13}\text{Alm}_{77\sim 82}\text{Gro}_{3\sim 8}\text{Spss}_{2\sim 4}$),由核部到幔部成分环带不明显,仅在石榴石边部形成铁、镁升高而钙明显降低的退变质边(图 3a、表 1)。白云母有两种产状:一种是在基质中与石榴石、石

英、长石共生,定向明显,形成岩石片理(图 2d);另一种产于石榴石包裹体中,没有明显定向。电子探针成分分析表明两类不同产出状态的白云母单位分子中 Si 的含量均在 3.30 p. f. u. 左右,比沙柳河含多硅白云母榴辉岩中多硅白云母的 Si 含量要低(3.4~3.45, Zhang G. *et al.*, 2008)。

样品 8S55 为石榴石白云母片麻岩,采自都兰北带,同样为榴辉岩的围岩(图 2b)。由于白云母的含量较高而呈亮白色,片理化明显,其矿物组成为石榴石(5%)、白云母(15%)、石英+长石(80%)、少量黑云母及富铝硅酸盐矿物(图 2e)。部分石榴石自形程度较高,电子探针成分分析表明石榴石的组成为 $\text{Prp}_{10\sim 11}\text{Alm}_{73\sim 78}\text{Gro}_{9\sim 15}\text{Spss}_{2\sim 4}$,核幔部无环带,边部具有退变质边,与沙柳河剖面样品 8S01 类似,但具有明显高的钙铝榴石含量(图 3b、表 1)。白云母定向明显,组成岩石的片麻理,其单位分子中 Si 的含量均在 3.16~3.25 p. f. u. 左右。斜长石为更长石。

样品 8S116 为石榴石二云母片麻岩,采自都兰南带地区(图 2c)。其矿物组成为石榴石(10%)、白

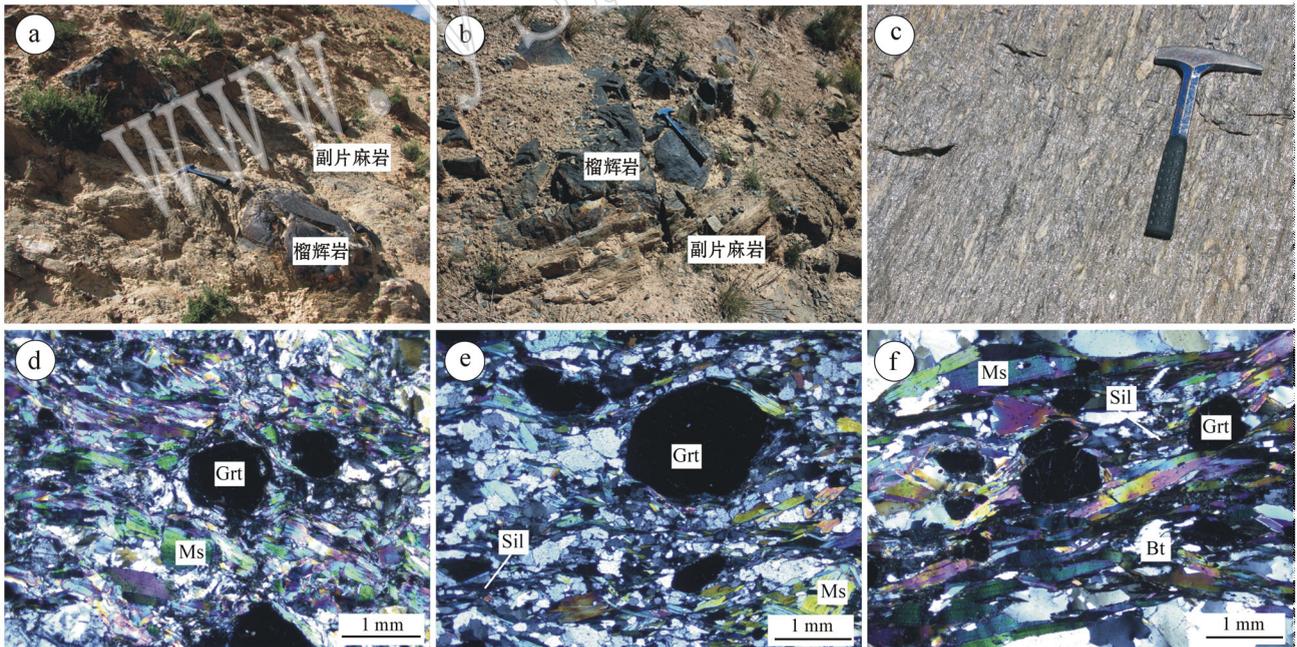


图 2 都兰含石榴石副片麻岩的野外产状及其显微照片

Fig. 2 Field attitude and mineral assemblages of the garnet-bearing paragneiss from Dulan terrane

a—沙柳河剖面榴辉岩的围岩副片麻岩,地质锤长约 30 cm; b—都兰北带榴辉岩的围岩副片麻岩; c—都兰南带定向的副片麻岩; d—沙柳河剖面样品 8S01 的显微照片(正交偏光); e—都兰北带样品 8S55 的显微照片(正交偏光); f—都兰南带样品 8S116 的显微照片(正交偏光)
a—paragneiss country rock of eclogite along Shaliuhe cross section, the hammer is ca. 30 cm; b—paragneiss country rock eclogite in North Dulan belt; c—foliated paragneiss in South Dulan belt; d—Mineral assemblage of sample 8S01 from Shaliuhe cross section (crossed nicols); e—mineral assemblage of sample 8S55 from North Dulan belt (crossed nicols); f—mineral assemblage of sample 8S116 from South Dulan belt (crossed nicols)

$w_B/\%$

表 1 柴北缘都兰含石榴石副片麻岩中代表矿物的电子探针成分

Table 1 Electron microprobe analyses of representative minerals of garnet-bearing paragneiss from Dulan terrane, North Qaidam

矿物	8S01					8S55					8S116						
	Grt-r	Grt-m	Grt-c	Ms	Bt	Grt-r	Grt-m	Grt-c	Alb	Ms	Bt	Kfs	Grt-r	Grt-m	Grt-c	Ms	Ab
SiO ₂	36.63	37.03	37.16	50.74	37.01	36.98	36.96	66.72	50.24	36.32	68.45	37.35	37.51	37.36	48.74	64.73	36.37
TiO ₂	0	0.03	0.03	0.71	0.01	0.04	0.01	0.02	0.74	0.30	0.01	0.03	0.01	0.02	0.62	0.00	1.88
Al ₂ O ₃	20.77	20.72	20.84	32.55	21.08	20.43	20.62	22.16	34.21	19.12	18.60	20.74	20.71	20.67	36.13	21.30	18.89
Cr ₂ O ₃	0.01	0	0.02	0.02	0	0.01	0	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.02	0	0.02	0.01	0.03
FeO	36.82	35.98	36.17	1.50	35.5	34.1	33.86	0.06	1.40	23.14	0.06	37.11	35.63	34.86	1.00	0.02	20.06
MnO	1.24	1.69	1.76	0.01	1.66	0.92	0.94	0.00	0.00	0.24	0.01	1.57	1.37	2	0.00	0.23	0.04
MgO	3.07	2.04	1.93	1.47	2.44	2.48	2.39	0.00	1.15	7.71	0.00	3.15	3.16	3.02	0.68	0.00	8.74
CaO	0.89	2.69	2.89	0.06	3.05	4.52	5.06	3.84	0.01	0.04	0.00	0.82	2.53	2.51	0.01	3.07	0.00
Na ₂ O	0	0.01	0.01	0.72	0.02	0.03	0.01	7.79	0.44	0.05	0.29	0.01	0.03	0.01	1.00	9.68	0.28
K ₂ O	-	-	-	6.66	-	-	-	0.10	6.80	8.09	13.41	-	-	-	6.04	0.10	7.20
Total	99.44	100.19	100.81	94.45	100.78	99.51	99.86	100.70	95.00	95.05	100.85	100.8	100.96	100.45	94.24	99.14	93.50
Si	2.98	2.99	2.99	3.30	2.96	2.99	2.97	2.89	3.25	2.78	3.06	3.00	2.99	2.99	3.17	2.88	2.78
Ti	0	0	0	0.04	0	0	0	0.00	0.04	0.02	0.00	0	0	0	0.03	0.00	0.11
Al	1.99	1.98	1.98	2.50	1.99	1.95	1.96	1.13	2.61	1.73	0.98	1.96	1.95	1.95	2.77	1.12	1.71
Cr	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.06	0.04	0.05	0.06	0.09	0.08	0.10	0.00	0.05	0.08	0.00	0.05	0.08	0.06	0.04	0.00	0.00
Fe ²⁺	2.44	2.40	2.39	0.03	2.29	2.23	2.18	0.00	0.02	1.41	0.00	2.44	2.30	2.28	0.02	0.00	1.28
Mn	0.09	0.12	0.12	0.00	0.11	0.06	0.06	0.00	0.00	0.02	0.00	0.11	0.09	0.14	0.00	0.01	0.00
Mg	0.37	0.25	0.23	0.14	0.29	0.30	0.29	0.00	0.11	0.88	0.00	0.38	0.38	0.36	0.07	0.00	1.00
Ca	0.08	0.23	0.25	0.00	0.26	0.39	0.44	0.18	0.00	0.00	0.00	0.07	0.22	0.22	0.00	0.15	0.00
Na	0	0	0	0.09	0	0.01	0	0.66	0.06	0.01	0.03	0	0.01	0	0.13	0.83	0.04
K	-	-	-	0.55	-	-	-	0.01	0.56	0.79	0.77	-	-	-	0.50	0.01	0.70
Total	8.00	8.00	8.00	6.71	8.00	8.00	8.00	4.87	6.70	7.70	4.84	8.00	8.00	8.00	6.71	4.99	7.63

Grt—石榴石；Bt—黑云母；Ms—白云母；Ab—钠长石；Kfs—钾长石；r—边部；m—幔部；c—核部。

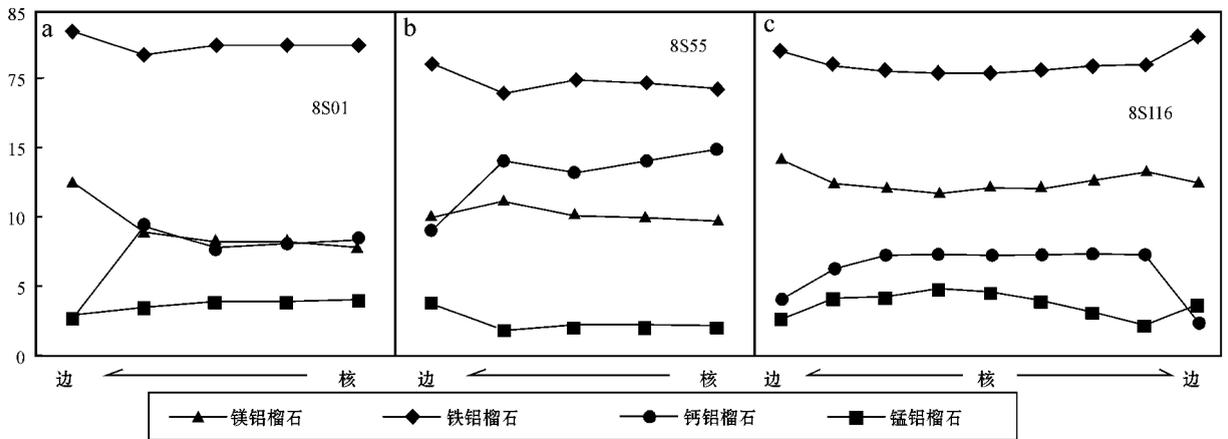


图 3 都兰地区副片麻岩中的石榴石成分剖面图

Fig. 3 Composition profile of garnet in paragneiss from Dulan terrane

云母 + 黑云母 (15%)、长石 + 石英 (75%, 图 2f) 及少量矽线石。石榴石成分为 $\text{Prp}_{12-14}\text{Alm}_{76-82}\text{Gro}_{2-7}\text{Spss}_{12-13}$ 。由核部到幔部没有明显成分环带, 幔部到边部具有微弱环带, 其中以铁、镁含量升高而钙、锰含量降低为特征 (图 3c、表 1)。利用石榴石-黑云母 Fe-Mg 交换地质温度计 (Bhattacharya *et al.*, 1992) 和石榴石-铝硅酸盐-石英-长石 (GASP) 地质压力计 (Newton and Haselton, 1981) 对样品 8S55 和 8S116 进行了温压估计, 得到样品 8S55 中石榴石核部保存的温压条件为 651°C 和 1.06 GPa, 石榴石退变边部及基质矿物组合的温压条件为 630°C 和 0.83 GPa。利用同样方法得到 8S116 样品中石榴石核、幔部的温压条件为 623°C 和 0.88 GPa, 边部为 617°C 和 0.48 GPa。从估计的温压条件来看, 都兰南北两带的泥质片麻岩均保存了角闪岩相变质温压条件, 且北带略高于南带。以上 3 个片麻岩样品中, 均有副矿物独居石出现, 为电子探针原位同位素定年提供了有利条件。

3 独居石电子探针定年方法

独居石电子探针 U-Th-Pb 化学方法 (CHIME) 测年最早由 Suzuki 和 Adachi (1991) 提出, 是对不同类型岩石中的副矿物独居石进行 U、Th、Pb 含量测试, 并结合 Th、U 元素放射性衰变理论进行年龄计算的一种测年方法, 定年原理详见 Suzuki 和 Adachi (1991)。Montel 等 (1996) 对独居石电子探针化学定年方法进行了系统的总结, 随着 Williams 等 (1999) 发表独居石年龄图谱以来, 该定年方法得到了广泛

的应用。独居石电子探针化学法 U-Th-Pb 定年的一个基本假设是在独居石形成时没有普通铅存在, 由于 ^{204}Pb 的原子半径大于独居石的晶格间隙, 所以 ^{204}Pb 很难存在于独居石晶格中 (Williams *et al.*, 2007)。本研究独居石电子探针定年工作是在荷兰 Utrecht 大学地球科学系完成, 应用 JEOL JXA-8600 型电子探针进行 U、Th、Pb 及稀土元素含量测试。测试条件为: 加速电压 20 kV, 电流为 50 nA, 非聚焦电子束测试直径为 5 μm 。所分析的元素种类、峰值、通道及校正标样详见表 2。不同种类元素分析均一次完成, 其中 Th、U、Pb 和稀土元素的分析时间分别为 200、200、300 和 50 s, 由于 Pb 的含量最低, 所以选择的分析时间最长。利用 Suzuki 和 Adachi (1991)

表 2 电子探针对于独居石不同元素的分析条件表

Table 2 Electron microprobe analysis conditions of different elements in monazite

元素种类	通道	分光计	晶体	校正标准	计数时间/s
Si	K α 1	1	TAP	Diopside	50
P	K α 1	2	TAP	Apatite	50
Y	L α 1	2	TAP	YP $_3$ O $_4$	50
Ca	K α 1	5	PET	Diopside	20
Th	M α 1	3	PET	ThF $_4$	200
U	M β 1	3	PET	UO $_2$	200
La	L α 1	4	LIF	LaP $_5$ O $_4$	50
Ce	L α 1	4	LIF	CeP $_5$ O $_4$	50
Pr	L β 1	4	LIF	PrP $_5$ O $_4$	50
Nd	L β 1	4	LIF	NdP $_5$ O $_4$	50
Sm	L β 1	4	LIF	SmP $_5$ O $_4$	50
Gd	L β 1	4	LIF	GdP $_5$ O $_4$	50
Dy	L β 1	4	LIF	DyP $_5$ O $_4$	50
Pb	M α 1	5	PET	PbS	300

方法对所得数据进行处理,计算独居石表面年龄,误差计算方法参照 Haring (2005)。独居石单晶标样年龄为1 125 Ma。

4 定年结果

本研究针对柴北缘超高压变质带都兰地区的3个不同区域的含石榴石副片麻岩中的独居石进行了电子探针定年测试。样品 8S01 在背散射图像的辅助下完成4个独居石颗粒55个点的成分测试。独居石均为它形粒状(图4a),粒径约为50~200 μm ,与基质矿物共生,多产于石英内。背散射图像中其成分环带不明显。独居石富集轻稀土元素,电子探针可检测有 La 到 Dy 及 Y 元素。样品 8S01 中总稀土元素含量介于56.67%~63.07%,轻稀土元素和中、重稀土元素有明显分异,与变质独居石的稀土元素配分模式类似(Williams *et al.*, 2007)。具有明显 Eu 正异常[(Eu/Eu*)_N = 1.22~2.91, Eu* = (Sm*

Gd)^{0.5} 图5b,表3],Y 含量介于0~0.85%之间。利用独居石化学法定年计算得到的表面年龄为369~492 Ma,55个测试点计算得到等时线年龄约为433 ± 15.4 Ma ($R^2 = 0.5246$,图5a)。

8S55 中的独居石为它形粒状,粒径30~200 μm 均与基质矿物共生(图4b)。独居石球粒陨石标准化稀土元素配分模式与8S01类似,稀土元素总量为57.91%~65.30%,Y 含量0~0.20%,较8S01略低,具有 Eu 正异常[(Eu/Eu*)_N = 1.45~2.13,图5d,表3]表面年龄介于362~517 Ma 之间,6个独居石颗粒101个测试点计算得到的等时线年龄为440 ± 11.2 Ma ($R^2 = 0.9006$,图5c)。

样品 8S116 中独居石的粒径为30~150 μm 之间(图4c)稀土元素总量介于36.38%~62.46%之间,Y 含量相对较高,最高可达1.46%,远高于沙柳河及都兰北带样品,同样具有 Eu 的正异常[(Eu/Eu*)_N = 1.14~2.50,图5f,表3],表面年龄范围为374~488 Ma,5个独居石颗粒58个测试点得到的等

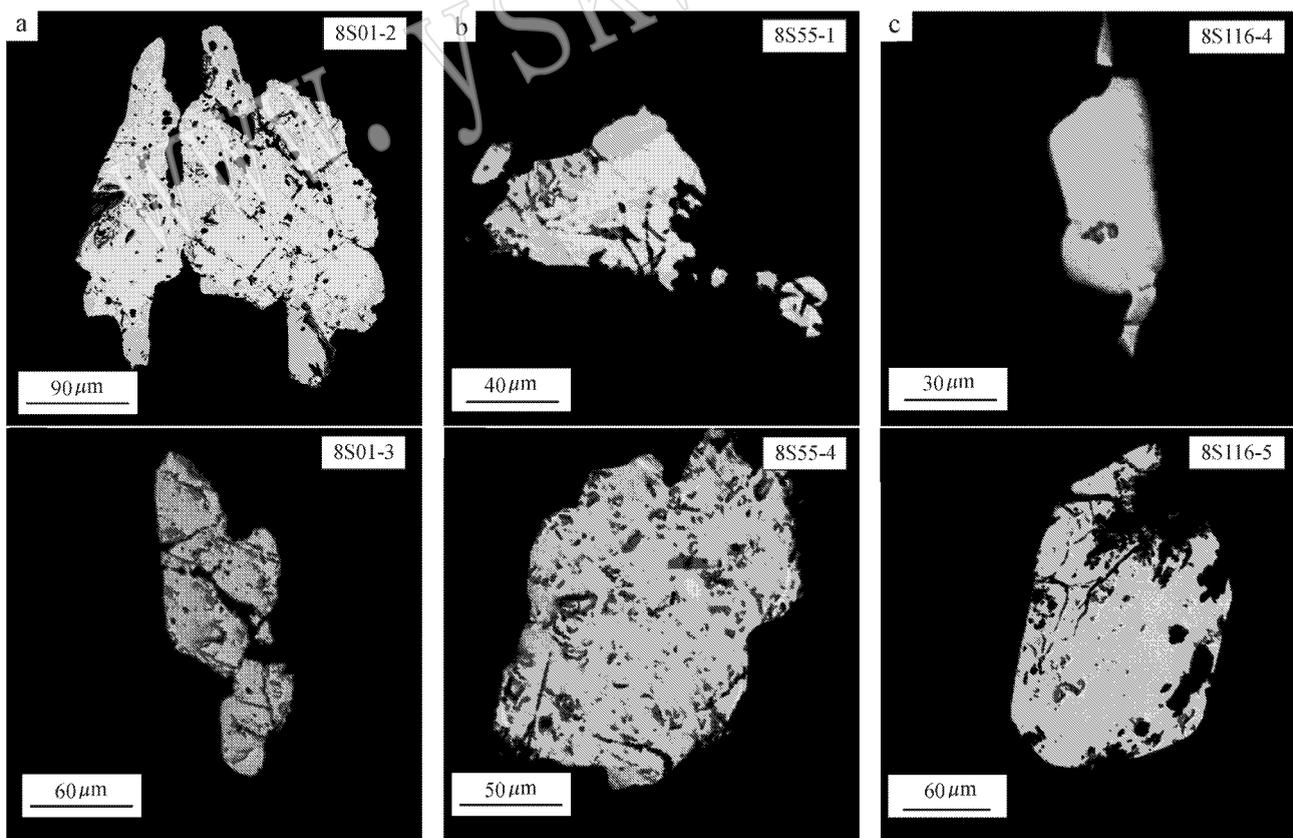


图4 副片麻岩中独居石的背散射图像

Fig. 4 BSE images of monazites in paragneiss

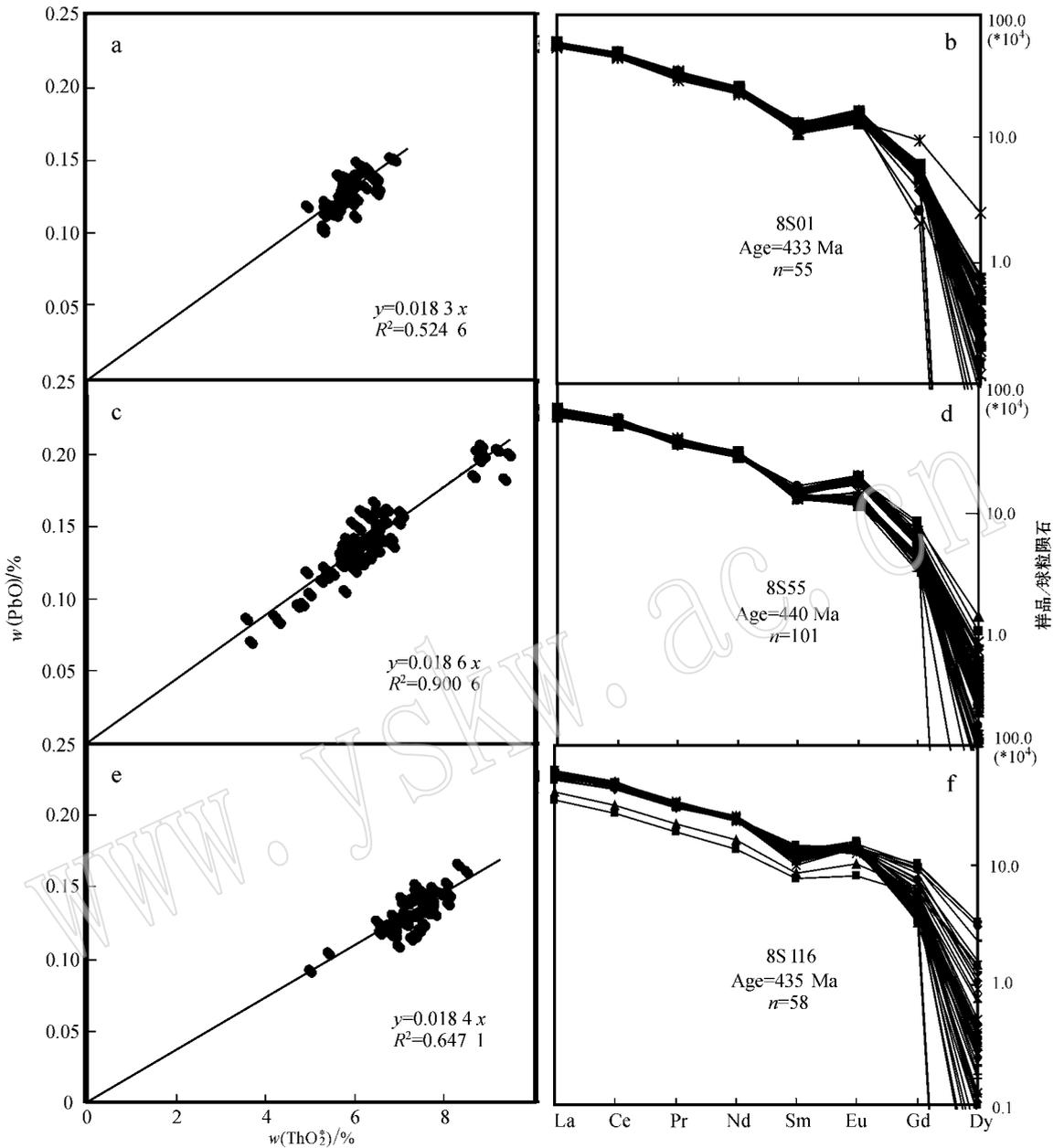


图 5 独居石的等时线年龄及其球粒陨石标准化稀土配分曲线

Fig. 5 Isochron ages and chondrite-normalized REE patterns

时线年龄为 $435 \pm 14.7 \text{ Ma}$ ($R^2=0.6471$, 图 5e)。

综上所述,都兰超高压变质地区 3 个副片麻岩中均含有变质作用形成的独居石,电子探针原位化学法定年表明 3 个样品的表面年龄分别为 433 ± 15.4 、 $440 \pm 11.2 \text{ Ma}$ 和 $435 \pm 14.7 \text{ Ma}$,其中都兰北带样品表面年龄老于其他 2 个样品,而都兰南带与沙柳河样品年龄类似。

5 讨论

5.1 独居石原位电子探针定年在变质岩定年中的应用

独居石族矿物作为一种含轻稀土元素的磷酸盐矿物广泛分布于各种岩石类型中,其分子结构为

表3 柴北缘都兰地区含石榴石副片麻岩电子探针独居石年龄及微量元素含量表

Table 3 Electronic microprobe monazite dating and trace element content of garnet-bearing paragneiss from Dulan terrane, North Qaidam

点	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Y	(Eu/Eu*) _N	PbO	ThO ₂	UO ₂	ThO ₂	年龄/Ma	误差/Ma
8S01																
1.1	13.55	29.89	3.02	11.50	1.78	0.92	1.12	0.10	0.03	1.99	0.12	5.10	0.65	7.24	405.51	14.63
1.2	13.72	29.90	3.14	11.38	1.86	0.92	1.01	0.04	0.00	2.05	0.13	5.03	0.60	6.99	443.43	15.27
1.3	13.91	29.82	3.11	11.52	1.84	0.94	1.09	0.07	0.00	2.03	0.14	5.12	0.63	7.18	457.58	14.99
1.4	13.37	29.80	3.07	12.09	1.88	0.84	0.41	0.00	0.00	2.91	0.15	5.07	0.93	8.11	439.78	13.42
1.5	12.93	27.87	2.97	10.82	1.94	0.78	1.96	0.63	0.85	1.22	0.14	4.84	0.80	7.49	454.27	14.46
1.6	13.61	30.28	3.04	11.73	1.70	0.79	0.52	0.05	0.00	2.56	0.15	5.03	0.98	8.26	428.89	13.17
1.7	13.60	29.94	3.12	11.40	1.87	0.89	1.06	0.09	0.00	1.93	0.14	5.45	0.66	7.61	437.13	14.16
1.8	13.20	27.84	3.00	11.36	1.91	0.83	1.06	0.16	0.16	1.77	0.11	5.35	0.57	7.21	368.66	14.47
1.9	13.56	29.34	3.07	11.60	1.85	0.86	1.05	0.12	0.06	1.87	0.13	5.49	0.70	7.80	397.40	13.66
1.10	13.51	28.97	2.98	11.60	1.81	0.84	1.13	0.18	0.09	1.79	0.13	5.49	0.70	7.77	387.98	13.66
1.11	13.88	29.84	3.08	11.53	1.96	0.88	1.14	0.02	0.00	1.79	0.14	5.55	0.68	7.79	416.18	13.78
2.1	13.99	29.52	3.12	11.96	1.96	0.85	1.18	0.00	0.00	1.71	0.13	4.91	0.62	6.97	453.96	15.38
2.2	13.07	28.46	3.01	11.57	1.91	0.89	0.92	0.03	0.00	2.05	0.12	4.95	0.63	7.03	413.59	15.05
2.3	14.13	29.83	3.13	11.58	1.82	0.86	0.96	0.00	0.00	1.98	0.13	4.88	0.59	6.84	444.57	15.58
2.4	13.74	29.68	3.09	11.83	1.84	0.85	1.05	0.09	0.00	1.86	0.13	4.94	0.61	6.95	432.02	15.29
2.5	14.07	29.66	3.13	11.64	1.95	0.83	0.94	0.03	0.00	1.87	0.14	5.33	0.70	7.61	436.64	14.15
2.6	14.10	29.99	3.17	12.05	1.82	0.95	0.93	0.00	0.00	2.23	0.12	4.52	0.56	6.37	435.77	16.51
2.7	13.81	29.51	3.06	11.85	1.88	0.92	1.02	0.05	0.00	2.03	0.12	4.69	0.60	6.64	409.01	15.78
2.8	14.00	29.43	3.10	12.00	1.93	0.84	1.01	0.06	0.00	1.84	0.13	5.02	0.62	7.06	426.37	15.05
2.9	13.87	30.01	3.08	11.67	1.91	0.89	0.98	0.05	0.00	1.99	0.13	4.84	0.63	6.90	430.26	15.38
2.10	13.58	29.09	3.15	12.07	1.94	0.89	0.95	0.01	0.00	1.99	0.13	5.01	0.66	7.16	436.86	14.93
2.11	14.13	29.78	2.97	11.41	1.88	0.84	1.03	0.04	0.01	1.84	0.12	4.80	0.60	6.76	407.46	15.54
2.12	13.74	28.66	3.03	11.85	2.02	0.95	1.19	0.08	0.01	1.86	0.12	4.95	0.55	6.75	435.60	15.71
2.13	13.77	29.85	3.09	11.77	1.92	0.92	1.05	0.01	0.00	1.98	0.13	5.03	0.60	7.00	442.52	15.25
2.14	14.10	29.01	2.93	11.79	1.91	0.89	1.19	0.12	0.00	1.79	0.12	5.00	0.49	6.61	425.15	15.93
2.15	14.05	28.91	2.99	11.78	1.93	0.87	1.30	0.08	0.00	1.68	0.15	5.30	0.59	7.23	484.01	15.02
3.1	13.84	29.76	2.97	11.45	1.85	0.81	0.94	0.02	0.00	1.88	0.13	5.34	0.65	7.47	417.71	14.29
3.2	13.72	29.54	3.11	11.54	1.82	0.83	1.02	0.05	0.00	1.86	0.11	4.87	0.55	6.68	397.84	15.64
3.3	13.99	30.12	3.04	11.37	1.76	0.82	0.96	0.06	0.00	1.91	0.13	4.95	0.58	6.85	432.11	15.48
3.4	14.10	30.04	3.13	11.35	1.67	0.76	1.01	0.08	0.00	1.78	0.14	4.85	0.61	6.87	476.16	15.68
3.5	14.06	29.91	3.13	11.47	1.84	0.84	0.89	0.14	0.00	1.99	0.13	4.93	0.62	6.97	429.74	15.24
3.6	12.63	27.09	2.80	10.70	1.70	0.78	0.92	0.05	0.00	1.89	0.12	4.62	0.56	6.45	427.72	16.30

$w_B/\%$

续表 3-1
Continued Table 3-1

点	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Y	(Eu/Eu*) _N	PbO	ThO ₂	UO ₂	ThO ₂ *	年龄/Ma	误差/Ma
3.7	14.12	29.38	3.00	10.75	1.80	0.79	0.93	0.06	0.00	1.86	0.12	4.90	0.60	6.87	418.38	15.37
3.8	14.02	29.68	3.05	11.28	1.78	0.87	1.00	0.10	0.00	1.99	0.13	4.98	0.57	6.87	455.87	15.57
3.9	14.00	29.89	3.10	11.23	1.75	0.82	1.09	0.09	0.01	1.81	0.14	5.03	0.58	6.95	467.97	15.49
3.10	13.15	28.54	3.12	10.98	1.76	0.87	0.99	0.19	0.11	2.00	0.11	4.79	0.47	6.33	392.34	16.33
3.11	13.31	29.19	3.01	11.51	1.92	0.80	0.77	0.05	0.00	2.01	0.14	5.44	0.60	7.41	453.30	14.57
3.12	13.61	29.49	3.02	11.41	1.87	0.84	1.04	0.07	0.00	1.83	0.14	5.31	0.64	7.42	458.82	14.58
4.1	13.62	29.32	3.10	11.89	2.01	0.92	1.19	0.15	0.00	1.80	0.12	5.16	0.60	7.13	401.51	14.79
4.2	13.73	29.57	3.17	12.03	1.98	0.90	1.18	0.07	0.00	1.79	0.14	4.94	0.55	6.76	488.76	15.97
4.3	13.86	29.93	3.29	11.92	1.92	0.89	1.12	0.14	0.00	1.86	0.10	4.64	0.51	6.32	380.61	16.30
4.4	13.50	29.61	3.25	12.13	1.98	0.88	1.22	0.09	0.00	1.71	0.11	4.56	0.55	6.38	416.32	16.38
4.5	13.70	30.04	3.27	11.81	1.91	0.92	1.12	0.12	0.03	1.92	0.12	4.68	0.51	6.37	452.47	16.61
4.6	13.51	29.04	2.99	11.73	2.04	0.88	1.28	0.09	0.00	1.66	0.14	5.59	0.63	7.65	424.01	14.03
4.7	13.69	29.13	3.15	11.60	1.89	0.90	1.22	0.14	0.00	1.80	0.15	5.40	0.60	7.39	465.05	14.66
4.8	13.41	29.31	3.15	12.05	2.00	0.91	1.19	0.02	0.00	1.79	0.12	4.98	0.61	6.97	417.90	15.17
4.9	13.86	29.81	3.13	11.85	2.00	0.94	1.25	0.14	0.00	1.81	0.12	4.81	0.53	6.56	420.85	16.02
4.10	13.51	30.03	3.24	11.93	1.93	0.93	1.18	0.09	0.00	1.87	0.12	4.70	0.52	6.41	433.88	16.41
4.11	13.42	29.08	3.15	11.59	1.84	0.82	1.24	0.06	0.02	1.65	0.14	4.84	0.57	6.71	491.63	16.08
4.12	13.62	29.49	3.12	11.89	1.89	0.79	1.21	0.01	0.00	1.60	0.11	4.78	0.54	6.57	410.97	15.94
4.13	12.87	27.77	2.85	10.90	1.75	0.82	1.16	0.07	0.00	1.75	0.12	4.37	0.46	5.90	475.74	17.88
4.14	13.58	29.21	3.04	11.98	2.02	0.93	1.17	0.14	0.00	1.84	0.13	4.94	0.59	6.87	449.01	15.53
4.15	13.57	29.19	3.08	11.82	2.08	0.90	1.22	0.11	0.00	1.71	0.12	4.96	0.58	6.87	428.26	15.43
4.16	13.63	29.60	3.08	11.90	1.98	0.97	1.14	0.05	0.00	1.98	0.12	5.04	0.55	6.85	421.50	15.42
4.17	14.09	29.62	3.09	11.71	1.94	0.96	1.11	0.08	0.00	2.00	0.13	4.92	0.60	6.90	433.78	15.40
8S55																
1.1	14.48	29.85	3.28	12.66	1.75	0.65	0.75	0.05	0.10	1.73	0.12	5.35	0.30	6.33	453.61	16.65
1.2	14.52	30.30	3.27	12.69	1.76	0.65	0.75	0.03	0.11	1.72	0.12	5.40	0.31	6.43	424.31	16.28
1.3	14.13	30.24	3.24	12.54	1.77	0.65	0.78	0.05	0.06	1.69	0.13	5.90	0.28	6.83	452.30	15.59
1.4	14.33	30.05	3.12	12.58	1.82	0.62	0.73	0.03	0.09	1.64	0.13	6.52	0.34	7.63	411.48	13.97
1.5	14.08	29.74	3.22	12.57	1.88	0.61	0.70	0.09	0.08	1.63	0.13	6.50	0.32	7.56	401.75	14.03
1.6	13.91	29.21	3.10	12.19	1.78	0.63	0.77	0.07	0.10	1.63	0.16	7.34	0.33	8.44	442.24	12.92
1.7	13.57	28.40	3.10	12.35	1.77	0.67	0.77	0.03	0.10	1.76	0.19	8.89	0.44	10.35	423.05	10.76
1.8	13.58	28.51	3.13	12.44	1.72	0.61	0.79	0.06	0.08	1.60	0.21	8.90	0.50	10.55	462.40	10.73
1.9	14.08	28.40	3.14	12.23	1.75	0.59	0.76	0.06	0.08	1.57	0.20	9.31	0.50	10.96	437.55	10.29

续表 3-2
Continued Table 3-2

点	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Y	(Eu/Eu*) _N	PbO	ThO ₂	UO ₂	ThO ₂ *	年龄/Ma	误差/Ma
1.10	13.29	28.38	2.98	12.37	1.74	0.60	0.68	0.01	0.11	1.67	0.20	9.37	0.58	11.28	419.45	9.98
1.11	14.93	31.24	3.16	12.27	1.79	0.63	0.71	0.00	0.04	1.72	0.09	4.27	0.26	5.13	391.05	19.57
1.12	14.69	30.59	3.29	12.30	1.77	0.72	0.75	0.07	0.10	1.93	0.10	5.13	0.26	5.97	409.38	17.26
1.13	14.97	30.86	3.19	12.58	1.86	0.65	0.72	0.09	0.05	1.72	0.10	4.70	0.29	5.66	400.19	18.03
1.14	14.90	31.03	3.29	12.78	1.76	0.68	0.72	0.02	0.06	1.85	0.10	4.85	0.28	5.78	395.21	17.68
1.15	14.65	30.10	3.07	11.45	1.90	0.86	0.93	0.09	0.00	1.97	0.15	4.89	0.88	7.77	440.04	13.93
1.16	14.59	30.17	3.22	12.04	1.97	0.94	0.99	0.11	0.04	2.04	0.14	4.76	0.83	7.47	437.50	14.40
1.17	14.04	30.18	3.23	12.05	1.99	0.97	1.00	0.05	0.02	2.10	0.13	4.61	0.74	7.05	450.57	15.21
1.18	13.75	29.74	3.10	12.43	2.06	0.99	1.17	0.13	0.05	1.94	0.16	5.31	0.94	8.41	448.02	13.05
2.1	14.65	30.10	3.07	11.45	1.90	0.86	0.93	0.09	0.00	1.97	0.15	4.89	0.88	7.77	440.04	13.93
2.2	14.59	30.17	3.22	12.04	1.97	0.94	0.99	0.11	0.04	2.04	0.14	4.76	0.83	7.47	437.50	14.40
2.3	14.04	30.18	3.23	12.05	1.99	0.97	1.00	0.05	0.02	2.10	0.13	4.61	0.74	7.05	450.57	15.21
2.4	13.75	29.74	3.10	12.43	2.06	0.99	1.17	0.13	0.05	1.94	0.16	5.31	0.94	8.41	448.02	13.05
2.5	14.48	29.85	3.28	12.66	1.75	0.65	0.75	0.05	0.10	1.73	0.12	5.35	0.30	6.33	453.61	16.65
2.6	14.52	30.30	3.27	12.69	1.76	0.65	0.75	0.03	0.11	1.72	0.12	5.40	0.31	6.43	424.31	16.28
2.7	14.13	30.24	3.24	12.54	1.77	0.65	0.78	0.05	0.06	1.69	0.13	5.90	0.28	6.83	452.30	15.59
2.8	14.33	30.05	3.12	12.58	1.82	0.62	0.73	0.03	0.09	1.64	0.13	6.52	0.34	7.63	411.48	13.97
2.9	13.91	29.21	3.10	12.19	1.78	0.63	0.77	0.07	0.10	1.63	0.16	7.34	0.33	8.44	442.24	12.92
2.10	13.57	28.40	3.10	12.35	1.77	0.67	0.77	0.03	0.10	1.76	0.19	8.89	0.44	10.35	423.05	10.76
2.11	13.58	28.51	3.13	12.44	1.72	0.61	0.79	0.06	0.08	1.60	0.21	8.90	0.50	10.55	462.40	10.73
2.12	14.08	28.40	3.14	12.23	1.75	0.59	0.76	0.06	0.08	1.57	0.20	9.31	0.50	10.96	437.55	10.29
2.13	13.29	28.38	2.98	12.37	1.74	0.60	0.68	0.01	0.11	1.67	0.20	9.37	0.58	11.28	419.45	9.98
2.14	14.37	29.81	3.18	12.33	1.63	0.67	0.62	0.04	0.08	2.05	0.12	4.97	0.27	5.87	475.20	17.90
2.15	14.16	29.64	3.25	12.44	1.74	0.58	0.58	0.14	0.07	1.75	0.11	5.32	0.29	6.27	426.39	16.66
2.16	13.83	28.82	3.08	12.24	1.67	0.65	0.60	0.02	0.05	1.98	0.14	6.72	0.29	7.66	443.63	14.06
2.17	14.03	29.39	3.01	12.41	1.80	0.63	0.75	0.02	0.10	1.66	0.14	6.47	0.33	7.56	443.52	14.23
2.18	13.88	29.24	3.20	12.29	1.71	0.67	0.80	0.09	0.09	1.74	0.14	6.54	0.28	7.46	443.68	14.39
2.19	13.71	29.23	3.19	12.42	1.82	0.59	0.70	0.10	0.09	1.60	0.14	7.16	0.31	8.17	410.81	13.16
2.20	12.78	27.17	3.09	11.67	1.75	0.56	0.80	0.09	0.19	1.45	0.18	9.85	0.41	11.19	387.53	9.92
2.21	13.48	28.17	3.06	12.17	1.79	0.59	0.70	0.07	0.09	1.61	0.20	9.02	0.49	10.63	442.08	10.58
2.22	12.86	27.20	3.09	12.04	1.68	0.58	0.74	0.02	0.09	1.59	0.20	8.93	0.48	10.51	440.08	10.68
2.23	13.30	28.59	3.11	12.09	1.83	0.63	0.70	0.06	0.13	1.68	0.20	8.68	0.53	10.42	458.37	10.83
3.1	14.93	31.24	3.16	12.27	1.79	0.63	0.71	0.00	0.04	1.72	0.09	4.27	0.26	5.13	391.05	19.57

续表 3-3
Continued Table 3-3

点	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Y	(Eu/Eu*) _N	PbO	ThO ₂	UO ₂	ThO ₂	年龄/Ma	误差/Ma
3.2	14.69	30.59	3.29	12.30	1.77	0.72	0.73	0.07	0.10	1.93	0.10	5.13	0.26	5.97	409.38	17.26
3.3	14.97	30.86	3.19	12.58	1.86	0.65	0.72	0.09	0.05	1.72	0.10	4.70	0.29	5.66	400.19	18.03
3.4	14.90	31.03	3.29	12.78	1.76	0.68	0.72	0.02	0.06	1.85	0.10	4.85	0.28	5.78	395.21	17.68
3.5	15.02	31.29	3.15	12.51	1.76	0.63	0.72	0.09	0.08	1.72	0.09	3.50	0.23	4.27	478.15	23.66
3.6	14.64	30.51	3.36	12.47	1.73	0.67	0.70	0.05	0.07	1.86	0.09	4.17	0.26	5.01	417.81	20.16
3.7	14.90	31.19	3.25	12.75	1.70	0.73	0.70	0.08	0.08	2.04	0.07	3.61	0.24	4.40	380.92	22.30
4.1	14.65	30.10	3.07	11.45	1.90	0.86	0.93	0.09	0.00	1.97	0.15	4.89	0.88	7.77	440.04	13.93
4.2	14.59	30.17	3.22	12.04	1.97	0.94	0.99	0.11	0.04	2.04	0.14	4.76	0.83	7.47	437.50	14.40
4.3	14.04	30.18	3.23	12.05	1.99	0.97	1.00	0.05	0.02	2.10	0.13	4.61	0.74	7.05	450.57	15.21
4.4	13.75	29.74	3.10	12.43	2.06	0.99	1.17	0.13	0.05	1.94	0.16	5.31	0.94	8.41	448.02	13.05
4.5	14.59	29.33	2.91	11.42	1.83	0.87	0.97	0.09	0.04	2.00	0.15	4.89	0.87	7.75	454.81	14.04
4.6	14.63	29.68	3.03	11.47	1.93	0.88	1.05	0.06	0.03	1.88	0.14	4.88	0.86	7.72	428.54	13.97
4.7	14.48	29.63	3.07	11.46	1.93	0.98	1.08	0.07	0.05	2.08	0.14	4.86	0.86	7.69	428.47	14.00
4.8	13.78	29.39	3.16	12.01	1.93	0.91	0.97	0.07	0.03	2.03	0.14	4.52	0.77	7.05	453.28	15.23
4.9	13.22	29.03	3.25	12.15	2.19	1.02	1.23	0.03	0.05	0.89	0.15	5.19	0.96	8.33	434.61	13.09
4.10	13.41	29.06	3.25	11.93	2.00	0.92	1.15	0.02	0.07	1.85	0.16	5.25	0.76	7.76	488.35	14.17
4.11	13.76	29.36	2.96	11.88	1.95	0.91	1.03	0.07	0.04	1.97	0.14	4.70	0.75	7.18	466.01	15.06
4.12	13.50	29.42	3.21	11.91	2.01	0.93	1.18	0.11	0.04	1.84	0.14	4.71	0.74	7.14	456.94	15.08
4.13	13.82	29.56	2.93	12.06	1.94	0.85	1.08	0.07	0.03	1.79	0.13	4.54	0.71	6.87	433.27	15.46
4.14	13.05	29.19	3.10	11.93	2.06	0.96	1.47	0.22	0.20	1.68	0.13	4.63	0.71	6.97	452.13	15.38
4.15	13.76	29.05	3.11	11.37	1.88	0.91	1.37	0.30	0.19	1.73	0.16	4.74	0.78	7.33	516.57	15.02
4.16	13.78	29.53	3.08	12.03	1.89	0.94	1.03	0.05	0.01	2.05	0.14	4.98	0.77	7.52	432.45	14.30
4.17	14.07	28.89	3.06	11.72	1.91	1.00	1.25	0.18	0.08	1.98	0.15	4.92	0.83	7.65	476.92	14.30
5.1	13.62	29.69	3.11	11.82	1.85	0.92	1.00	0.00	0.02	2.07	0.12	4.50	0.71	6.82	426.95	15.52
5.2	13.65	29.48	3.03	12.00	1.88	0.88	1.06	0.17	0.04	1.90	0.14	4.56	0.72	6.95	480.97	15.56
5.3	13.62	29.51	3.20	11.95	2.00	0.88	0.96	0.02	0.03	1.93	0.13	4.60	0.75	7.08	444.13	15.12
5.4	13.61	29.40	3.21	11.79	1.90	0.91	1.05	0.07	0.06	1.97	0.13	4.48	0.73	6.89	457.41	15.57
5.5	13.56	29.42	3.05	11.86	1.99	0.90	1.01	0.12	0.04	1.92	0.14	5.05	0.80	7.68	418.96	13.98
5.6	13.48	29.52	3.19	11.90	2.01	0.90	1.03	0.09	0.03	1.91	0.13	5.08	0.83	7.79	405.51	13.74
5.7	13.56	29.05	3.17	11.82	2.07	1.01	1.09	0.12	0.07	2.04	0.15	5.16	0.81	7.81	450.10	13.92
5.8	13.93	30.06	3.13	11.93	1.92	0.95	0.97	0.06	0.05	2.13	0.13	4.64	0.74	7.08	423.82	15.01
5.9	13.69	29.79	3.22	11.90	1.94	0.89	1.01	0.10	0.06	1.94	0.13	4.68	0.73	7.08	440.03	15.11
5.10	13.19	29.20	3.41	12.03	2.00	0.94	1.08	0.06	0.02	1.94	0.16	4.99	0.93	8.06	473.01	13.66

续表 3-4
Continued Table 3-4

点	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Y	(Eu/Eu*) _N	PbO	ThO ₂	UO ₂	ThO ₂ *	年龄/Ma	误差/Ma
5.11	13.57	29.51	3.18	11.93	1.99	0.96	1.11	0.11	0.03	1.96	0.14	4.69	0.82	7.40	445.64	14.57
5.12	13.68	29.22	3.20	11.97	1.98	0.95	1.07	0.08	0.06	1.99	0.14	4.65	0.81	7.31	442.94	14.71
5.13	13.52	29.10	3.13	12.14	2.01	0.93	1.02	0.16	0.04	1.99	0.15	5.18	0.86	8.00	453.43	13.65
5.14	13.70	29.14	3.19	11.99	2.00	0.90	1.07	0.11	0.05	1.88	0.14	5.27	0.89	8.19	395.11	13.10
5.15	13.57	29.45	3.05	11.89	1.90	0.89	1.12	0.01	0.06	1.86	0.14	5.19	0.83	7.92	419.59	13.61
5.16	13.45	29.17	3.22	12.00	1.91	0.94	1.07	0.02	0.04	2.01	0.14	5.08	0.80	7.72	427.52	13.94
5.17	13.54	29.45	3.12	11.96	1.95	0.92	0.96	0.16	0.06	2.04	0.16	4.92	0.77	7.48	501.62	14.69
5.18	13.87	29.50	3.07	11.98	1.90	0.92	0.96	0.07	0.06	2.09	0.15	4.83	0.74	7.28	481.93	14.95
5.19	13.51	28.93	3.10	11.94	1.95	0.92	1.01	0.06	0.04	2.00	0.17	5.13	0.77	7.69	512.72	14.39
5.20	13.53	29.19	3.03	12.12	2.05	0.98	1.01	0.10	0.04	2.07	0.12	4.78	0.73	7.18	394.87	14.69
6.1	13.67	29.38	3.12	12.15	1.87	0.86	1.02	0.09	0.00	1.90	0.13	4.84	0.77	7.37	400.56	14.39
6.2	13.39	29.10	3.10	12.03	2.07	0.93	1.07	0.09	0.03	1.91	0.16	4.85	0.81	7.52	492.05	14.59
6.3	13.50	29.10	3.35	11.93	2.06	0.95	1.10	0.07	0.02	1.92	0.12	4.78	0.74	7.22	407.62	14.68
6.4	13.50	29.53	3.18	11.93	1.97	0.94	0.97	0.00	0.04	2.07	0.13	4.53	0.72	6.88	430.50	15.43
6.5	13.67	29.78	3.02	11.98	2.02	0.91	1.04	0.08	0.02	1.91	0.13	4.47	0.72	6.85	460.73	15.65
6.6	13.40	28.88	3.10	11.64	1.96	0.90	1.05	0.09	0.03	1.93	0.13	4.79	0.79	7.39	411.21	14.40
6.7	13.79	29.32	3.29	12.01	1.98	0.86	1.08	0.02	0.03	1.80	0.11	4.42	0.75	6.89	361.94	15.03
6.8	13.30	29.28	3.08	11.89	2.01	0.90	1.06	0.13	0.01	1.88	0.13	4.96	0.74	7.39	407.56	14.38
6.9	13.62	29.58	3.16	12.18	2.08	0.92	1.15	0.09	0.02	1.81	0.13	4.42	0.74	6.84	441.37	15.57
6.10	13.51	29.30	3.12	12.06	1.91	0.91	1.18	0.13	0.00	1.85	0.13	4.45	0.71	6.79	454.77	15.73
6.11	13.44	29.06	2.97	12.16	1.94	0.92	1.06	0.08	0.04	1.95	0.12	4.39	0.67	6.58	423.30	15.99
6.12	13.37	28.97	3.20	12.18	2.03	0.95	1.13	0.08	0.02	1.91	0.14	4.54	0.70	6.87	470.41	15.67
6.13	13.55	29.33	3.07	11.97	1.91	0.93	1.12	0.03	0.03	1.93	0.13	4.61	0.70	6.90	429.02	15.39
6.14	13.78	29.32	3.07	11.77	1.91	0.93	1.03	0.08	0.04	2.02	0.12	4.46	0.73	6.85	425.11	15.46
6.15	13.34	29.38	3.15	12.21	1.89	0.92	1.02	0.07	0.04	2.02	0.15	4.74	0.71	7.10	506.64	15.39
8S116																
1.1	13.71	29.40	3.11	11.71	1.99	0.86	0.97	0.08	0.00	1.89	0.15	5.57	0.75	8.05	449.41	13.55
1.2	13.50	28.97	3.19	11.63	2.02	0.93	0.93	0.03	0.00	2.06	0.15	5.62	0.75	8.09	424.46	13.38
1.3	13.65	29.67	3.17	12.06	1.92	0.85	0.97	0.09	0.00	1.90	0.12	5.28	0.66	7.44	382.45	14.16
1.4	13.73	29.26	3.14	11.89	1.98	0.73	0.97	0.11	0.01	1.61	0.14	5.28	0.68	7.52	431.55	14.28
1.5	13.70	29.25	3.07	11.43	1.95	0.84	0.99	0.03	0.00	1.84	0.15	5.56	0.74	8.00	431.34	13.54
1.6	13.64	28.92	3.05	11.55	1.96	0.84	0.88	0.01	0.00	1.94	0.17	5.76	0.76	8.27	474.24	13.33
1.7	13.66	29.63	3.08	11.65	2.02	0.80	0.89	0.08	0.01	1.83	0.13	5.37	0.66	7.52	393.10	14.08

续表 3-5
Continued Table 3-5

点	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Y	(Eu/Eu*) _N	PbO ₂	ThO ₂	UO ₂	ThO ₂ ²	年龄/Ma	误差/Ma
1.8	13.71	29.57	3.08	11.59	1.89	0.82	0.90	0.00	0.00	1.91	0.14	5.40	0.65	7.52	433.74	14.28
1.9	13.83	29.42	3.17	11.56	1.87	0.83	0.95	0.05	0.00	1.90	0.14	5.36	0.68	7.60	436.27	14.17
1.10	13.91	29.39	3.20	11.71	1.95	0.81	0.95	0.12	0.03	1.80	0.14	5.45	0.69	7.71	429.22	13.97
1.11	13.79	29.07	3.10	11.71	1.95	0.80	0.93	0.01	0.00	1.81	0.14	5.44	0.70	7.73	420.75	13.89
1.12	13.48	29.52	3.07	11.76	1.89	0.80	0.93	0.08	0.01	1.84	0.15	5.44	0.66	7.63	449.99	14.19
1.13	13.82	29.69	3.21	11.69	1.83	0.81	0.94	0.07	0.00	1.88	0.13	5.05	0.62	7.09	419.71	14.97
1.14	13.73	29.32	3.12	11.73	2.02	0.85	0.92	0.10	0.00	1.89	0.14	5.10	0.59	7.06	464.29	15.25
1.15	13.92	29.09	3.10	11.69	1.94	0.87	0.92	0.03	0.02	2.00	0.12	5.11	0.61	7.13	412.97	14.86
1.16	13.62	29.19	3.12	11.80	1.89	0.80	1.15	0.05	0.00	1.65	0.13	5.09	0.64	7.19	428.55	14.83
1.17	13.56	29.67	3.23	11.85	1.93	0.84	1.03	0.01	0.02	1.80	0.12	4.91	0.57	6.79	409.44	15.49
1.18	14.05	29.03	2.92	11.61	2.01	0.79	1.04	0.07	0.00	1.67	0.16	5.20	1.00	8.49	447.41	12.94
2.1	8.27	16.72	1.80	6.40	1.20	0.48	1.16	0.36	0.76	1.23	0.09	3.52	0.44	4.97	437.71	20.49
2.2	9.78	19.58	2.07	7.52	1.30	0.59	1.28	0.38	0.79	1.40	0.10	3.93	0.45	5.41	456.27	19.16
2.3	13.32	27.58	2.94	10.90	1.90	0.78	1.46	0.29	0.37	1.42	0.13	4.73	0.72	7.09	438.04	15.07
2.4	13.47	28.90	3.08	11.60	1.98	0.86	1.24	0.13	0.16	1.68	0.14	5.00	0.94	8.07	407.84	13.33
2.5	13.49	28.81	3.04	11.69	1.98	0.83	1.09	0.10	0.09	1.71	0.14	5.27	0.75	7.73	435.02	13.97
2.6	13.69	28.69	3.01	11.92	1.92	0.76	1.00	0.09	0.02	1.67	0.13	5.15	0.61	7.14	417.13	14.85
2.7	13.59	29.13	3.05	11.68	2.05	0.81	0.95	0.00	0.02	1.77	0.15	5.34	0.66	7.51	461.80	14.45
2.8	13.60	28.92	3.02	11.65	1.79	0.82	0.96	0.07	0.02	1.90	0.15	5.33	0.61	7.34	488.43	14.86
2.9	13.80	29.55	3.07	11.66	1.96	0.77	0.95	0.09	0.00	1.72	0.11	5.07	0.66	7.24	374.27	14.44
2.10	13.74	28.94	3.10	11.63	1.94	0.80	0.97	0.02	0.02	1.77	0.14	4.97	0.66	7.15	465.63	15.09
2.11	13.70	29.26	3.07	11.81	1.93	0.79	1.12	0.10	0.09	1.65	0.12	5.05	0.70	7.34	375.29	14.29
2.12	13.49	28.71	3.02	11.52	1.89	0.84	1.30	0.20	0.24	1.64	0.14	4.89	0.79	7.50	442.31	14.38
2.13	13.30	28.56	3.05	11.59	1.91	0.78	1.45	0.23	0.26	1.43	0.15	5.09	0.85	7.90	437.54	13.72
3.1	14.57	29.74	2.99	11.13	1.67	0.82	0.85	0.04	0.00	2.10	0.13	5.07	0.69	7.33	420.77	14.54
3.2	14.59	29.83	3.14	11.04	1.72	0.84	0.72	0.00	0.00	2.32	0.14	5.26	0.71	7.60	420.61	14.09
3.3	14.35	29.97	3.08	11.12	1.62	0.81	0.72	0.00	0.00	2.29	0.14	5.23	0.72	7.60	443.93	14.22
3.4	14.46	30.12	3.02	11.20	1.62	0.82	0.77	0.06	0.00	2.25	0.15	5.34	0.73	7.73	456.77	14.07
3.5	14.67	29.98	3.01	10.91	1.67	0.78	0.70	0.00	0.00	2.21	0.14	5.34	0.70	7.65	432.37	14.08
3.6	14.31	29.84	2.99	11.07	1.69	0.88	0.68	0.02	0.00	2.50	0.13	5.22	0.70	7.53	419.34	14.20

续表 3-6
Continued Table 3-6

点	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Y	(Eu/Eu*) _N	PbO	ThO ₂	UO ₂	ThO ₂ *	年龄/Ma	误差/Ma
3.7	14.47	29.95	3.14	11.06	1.54	0.80	0.75	0.00	0.00	2.28	0.13	5.18	0.74	7.61	412.67	14.05
3.8	14.43	30.28	2.91	11.07	1.67	0.79	0.72	0.00	0.00	2.19	0.15	5.11	0.68	7.35	474.27	14.78
3.9	14.41	30.18	2.92	11.39	1.64	0.84	0.83	0.03	0.00	2.18	0.14	5.03	0.68	7.26	462.81	14.88
3.10	14.42	30.41	3.09	10.92	1.61	0.82	0.72	0.06	0.00	2.33	0.14	4.89	0.69	7.17	462.11	15.05
3.11	14.48	30.22	3.10	11.07	1.63	0.82	0.74	0.00	0.00	2.27	0.14	4.83	0.66	7.02	480.01	15.41
3.12	14.59	30.10	3.10	11.14	1.76	0.79	0.80	0.00	0.00	2.02	0.11	4.77	0.67	6.95	374.61	14.99
3.13	14.45	30.06	3.07	11.48	1.71	0.82	0.81	0.06	0.00	2.12	0.12	4.74	0.65	6.88	401.27	15.26
3.14	14.54	30.14	2.97	11.30	1.67	0.82	0.96	0.00	0.00	1.97	0.13	4.67	0.66	6.85	438.81	15.53
4.1	13.87	29.64	3.01	11.81	1.85	0.90	0.81	0.03	0.00	2.23	0.13	4.87	0.62	6.91	429.26	15.35
4.2	13.66	29.42	3.19	12.00	1.85	0.89	1.13	0.10	0.06	1.87	0.13	4.68	0.55	6.49	462.12	16.40
4.3	13.30	28.58	2.96	11.72	1.98	0.82	1.56	0.27	0.34	1.43	0.13	4.69	0.67	6.90	434.05	15.41
4.4	13.54	27.99	3.12	11.24	2.01	0.80	1.60	0.40	0.36	1.37	0.12	4.69	0.67	6.89	414.60	15.32
4.5	12.69	27.82	2.88	11.50	2.13	0.83	1.94	0.59	0.76	1.25	0.13	4.47	0.71	6.81	454.78	15.69
4.6	12.61	26.62	2.95	11.33	2.15	0.87	2.04	0.84	1.31	1.27	0.12	4.06	0.75	6.53	430.02	16.14
4.7	12.27	26.28	2.82	11.17	2.16	0.79	1.92	0.79	1.46	1.18	0.12	4.16	0.78	6.72	433.35	15.78
4.8	12.27	26.80	2.86	11.33	2.24	0.82	2.13	0.84	1.36	1.14	0.12	4.02	0.78	6.58	439.59	16.10
5.1	13.59	28.97	3.05	11.60	1.87	0.86	0.86	0.03	0.00	2.06	0.14	5.32	0.70	7.63	427.33	14.08
5.2	13.36	28.28	3.09	11.52	1.83	0.86	0.84	0.00	0.00	2.12	0.13	5.16	0.79	7.76	401.65	13.75
5.3	13.32	28.31	2.92	11.46	1.93	0.88	1.17	0.12	0.04	1.79	0.13	4.97	0.72	7.33	421.61	14.56
5.4	13.32	28.50	3.03	11.42	1.93	0.82	1.12	0.18	0.14	1.69	0.13	4.77	0.63	6.85	446.04	15.57
5.5	12.88	27.97	2.99	11.39	2.06	0.83	1.74	0.32	0.47	1.34	0.12	4.42	0.66	6.59	436.79	16.06

ABO₄ 型 A 位置常充填有 Ce、La、Nd、Pr、Th、Ca、Y 及少量的 U、Sm、Gd、Dy 等半径较大的离子。由于 HREEPO₄ 的晶体结构类似于锆石,所以重稀土元素很难存在于独居石晶格中(Boatner, 2002; Kolitsch and Holtstam, 2004)。B 位置主要为 P 元素,并有少量的 Si、As 或 V。根据轻稀土元素及 Th、U、Ca、Si 元素的分配可以分为 3 个端员,分别为独居石 LREEPO₄、斜钍石 (Th,U)SiO₄ 和磷钍钍石 Ca(Th,U)(PO₄)₂, 常见的独居石多为这 3 个端员的固溶体。独居石作为副矿物常出现在长英质的火山岩中,如花岗岩、闪长岩等,在伟晶岩及石英脉中同样可以生长独居石。不同原岩组成及变质级别的变质岩中独居石的分布也相当广泛,但主要集中在原岩为长英质及泥质的副片麻岩中,在基性岩及超基性岩中鲜有报道。变质温压条件为低角闪岩相以上 (>500/600℃),在高绿片岩相到低角闪岩相的温压范围内存在独居石到褐帘石的转化,使得独居石在较低变质温压条件下不易保存(Wing *et al.*, 2003),但在高角闪岩相到麻粒岩相变质过程中存在独居石的生长(Bea *et al.*, 1994; Pyle *et al.*, 2001; Krenn *et al.*, 2008),在榴辉岩相(超)高压变质条件下仍可稳定存在(如 Liou *et al.*, 1998; Terry *et al.*, 2000)。独居石稳定域较局限,并且具有极低的主量及微量元素扩散速率(Cherniak, 2000),使其能够保存其形成时或重结晶过程中的年代学信息。

了解变质岩石中独居石的生长过程在其定年及年代学数据解释上起着至关重要的作用。独居石中不同成分域的形成机制有所不同,其代表的年龄也具有不同的含义,如变质重结晶作用会重置独居石中的 U-Th-Pb 同位素体系,使测得的独居石年龄代表变质重结晶年龄。前人研究表明,在变质沉积岩中独居石的生长与石榴石的消耗有明显的相关关系,其发生的主要变质反应为:石榴石 + 绿泥石 + 白云母 = 铝硅酸盐 + 黑云母 + 水。在硅酸盐矿物中发现磷元素及稀土元素,表明独居石等磷酸盐矿物在变质过程中也参与了主要矿物的变质反应(Spear and Pyle, 2002),这种变质反应可以通过独居石不同的成分域及成分环带特征识别出来。在过去几十年的研究过程中,人们发现独居石的成分域及年龄环带是普遍存在的(Parrish and Tirrul, 1989; Pyle *et al.*, 2002; Williams *et al.*, 2007),且可以在背散射图像中被识别出来。独居石形成成分(年龄)环带的影响因素较多,不同成分的独居石交生产成分

交换,另外独居石形成及生长过程中温压条件发生变化,都能使其成分受到影响。

独居石中的 U 和 Th 元素环带与其 Ca、Si 和轻稀土元素环带比较相似(Spear and Pyle, 2002)。Y 元素环带在独居石不同元素环带中尤为重要,研究表明 Y 元素环带与 Th、U 环带特征相似,通常表明独居石生长过程中温压条件及主要矿物组合的变化(Pyle and Spear 2003)。不同成分域或成分环带的边界在 BSE 图像中非常清晰,表明其受到了不同机制的改造作用而不是元素扩散的影响。在以往的研究过程中,人们利用不同的测试手段对独居石不同成分域进行了分析和年代学研究,如 SIMS、SHRIMP、X 射线面扫描和电子探针分析(e.g. Parrish and Tirrul, 1989; Williams, 1998; Zhu and O'Nions, 1999)。这些研究表明独居石的不同成分域与年龄不是一一对应的,如 Terry 等(2000)在研究挪威西片麻岩地区的独居石中发现同一颗独居石中具有 4 种不同的成分域特征,但定年结果表明这 4 种成分域仅记录了 2 期年龄特征,所以在区别独居石经历的热事件时,不能仅仅通过对其成分环带的观察和测试而定,而是应该进行详细的年代学测试后才能给出结论。电子探针独居石化学定年方法(CHIME, Suzuki and Adachi, 1991)是利用电子探针原位测试独居石中的 Th、U 和 total Pb 含量,在假设没有普通 Pb 和放射性成因 Pb 丢失的情况下,计算独居石表面年龄的方法,其优势在于:①在背散射图像下,在岩石薄片中原位对独居石年龄进行测试,可以把独居石不同成分域的年龄与变质过程相联系,并清楚独居石与其寄主矿物之间的关系;②电子探针可利用较小电子束斑(1~5 μm)对单颗粒独居石进行快速(13 min/point)多点分析,得到统计学年龄结果;③与 LA-ICP-MS 定年相比,电子探针独居石定年对样品进行无损伤分析,可以对所测样品进行重复测试以对所得年龄进行检验。

5.2 片麻岩中独居石的年龄结构及其地质意义

本文对柴北缘超高压变质带东端都兰地区 3 个含石榴石副片麻岩进行了岩石学研究及独居石原位电子探针定年,分别得到约 433 ± 15.4 Ma(8S01, 沙柳河剖面)、440 ± 11.2 Ma(8S55, 都兰北带)及 435 ± 14.7 Ma(8S116, 都兰南带)的变质独居石形成或者重结晶年龄。其中沙柳河及都兰南带的两个样品年龄相似,与北带样品有约 5 Ma 的年龄差。造成这种差异的原因可能是副片麻岩所经历的变质过程不

同导致独居石记录的年龄有所不同,或者副片麻岩经历相同或者类似的变质过程,但独居石记录了不同变质条件下的表面年龄。Song 等(2003a)通过对都兰南北两带榴辉岩岩石学研究及温压计算,得知二者分别经历了不同的退变质过程,但随着研究区内海量锆石年代学及榴辉岩地球化学数据的发表(如 Mattinson *et al.*, 2006, 2009; Zhang G. *et al.*, 2008, 2009b; Chen *et al.*, 2009; Zhang J *et al.*, 2010; Yu *et al.*, 2012, 2013)以及两带都存在柯石英的事实(Zhang G. *et al.*, 2009b; 张建新等, 2009),表明都兰北带与南带很可能经历了相同或者类似的变质演化过程,排除了两带副片麻岩独居石中记录的年龄差异是经历不同变质过程而产生的。

都兰地区 3 个测试样品中的独居石均具有 Eu 的正异常,其中 $(Eu/Eu^*)_{N} = 1.14\% \sim 2.91\%$,并集中在 $1.5\% \sim 2.4\%$ 之间,推断是样品中石榴石中的钙铝榴石端员在减压退变过程中向铁铝榴石转化,导致 Eu 元素在石榴石与独居石之间的分配系数改变,而使独居石中的 Eu 元素含量增加,这与样品中石榴石边部 Ca 含量降低及记录降温降压过程相吻合(图 3)。在所测样品中独居石中的 Y 含量通常较

低 ($<0.2\%$),但都兰南带 8S116 样品部分测试点具有较高 Y 含量 ($0.2\% \sim 1.46\%$),且 Y 与 Eu/Eu^* 之间具有明显负相关性 ($Eu^* = (Sm^* Gd)^{1/2}$),图 6b 如前所述,独居石中 Eu/Eu^* 升高表示与其共生的石榴石中 Ca 含量降低,为一个降温降压的退变质过程 (Spear and Pyle, 2002)。在此过程中石榴石中的 Y 含量由于温度降低而升高 (Pyle and Spear, 1999; Pyle *et al.*, 2000),导致与其共生的独居石中 Y 含量降低。大多数高 Y 含量的独居石测试点年龄集中于 $440 \sim 430$ Ma 之间(图 6a),从而推断 $440 \sim 430$ Ma 都兰地区部分副片麻岩经历了角闪岩相退变质作用。该年龄范围与沙柳河及都兰北带含石榴石副片麻岩锆石中记录的 438 ± 4 Ma (Yu *et al.*, 2013) 和 431 ± 5 Ma (Mattinson *et al.*, 2009) 类似。Zhang G 等在沙柳河地区报道了由 3 类榴辉岩及蛇纹石化超基性岩恢复出的古生代洋壳物质,并在榴辉岩中发现超高压指示性矿物柯石英,SHRIMP 锆石 U-Pb 定年得到峰期榴辉岩相变质年龄为 $445 \sim 440$ Ma (Zhang G *et al.*, 2008, 2009b)。作为榴辉岩的围岩,副片麻岩与其经历了类似的变质过程,并由独居石记录了 $440 \sim 433$ Ma 的角闪岩相退变质过程。

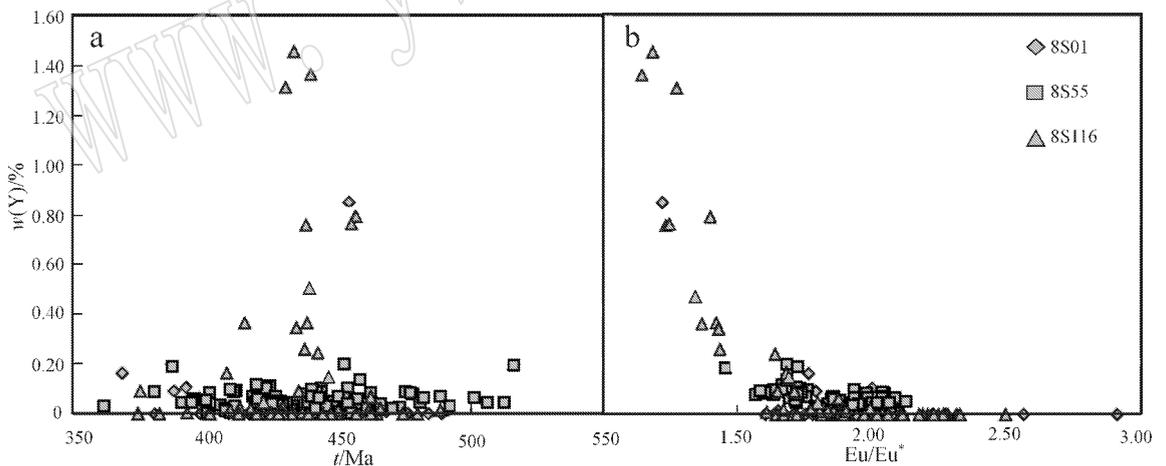


图 6 副片麻岩中独居石 Y 含量与年龄 (a) 和 Eu/Eu^* (b) 的关系图

Fig. 6 Y versus age diagram (a) and Eu/Eu^* versus Y diagram (b) illustrating compositional differences between analyzed monazites from paragneiss

致谢 在本文研究过程中,荷兰乌特勒支大学 Herman van Roermund 教授、Tilly Bouten 工程师及北京大学研究生田作林、韩磊同学曾给予帮助,在此表示感谢!

References

Bea F, Pereira M D and Stroth A. 1994. Mineral/leu-cosome trace-element partitioning in a peraluminous migmatite (a laser ablation-ICP-

- MS study [J]. *Chemical Geology* , 117 : 291 ~ 312.
- Bhattacharya A , Mohanty L , Maji A , *et al.* 1992. Nonideal mixing in the phlogopite-annite binary -constraints from experimental-data on Mg-Fe partitioning and a reformulation of the biotite garnet geothermometer [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology* , 111 : 87 ~ 93.
- Boatner L A. 2002. Synthesis , structure , and properties of monazite , pretilite , and xenotime [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* , 48 (1) : 87 ~ 121.
- Carswell D A. 1990. *Eclogite Facies Rocks* [M]. New York : Blackie , 396.
- Chen Danling , Liu Liang and Sun Yong. 2008. Zircon U-Pb dating of paragneiss interbed in the UHP eclogite from Yematan area , the North Qaidam UHP terrane , NW China [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 24 (5) : 1 059 ~ 1 067 (in Chinese with English abstract).
- Chen D L , Liu L , Sun Y , *et al.* 2009. Geochemistry and zircon U-Pb dating and its implications of the Yukaha HP/UHP terrane , the North Qaidam , NW China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences* , 35 : 259 ~ 272.
- Cherniak D J. 2000. Rare earth element diffusion in apatite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 64 : 3 871 ~ 3 885.
- Chopin C. 1984. Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the Western Alps—a 1st record and some consequences [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology* , 86 : 107 ~ 118.
- Coleman R G and Wang X. 1995. *Ultrahigh-pressure metamorphism* [M]. New York : Cambridge University Press , 528.
- Ernst W G. 2001. Subduction , ultrahigh-pressure metamorphism , and regurgitation of buoyant crustal slices—implications for arcs and continental growth [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* , 127 : 253 ~ 275.
- Ernst W G and Liou J G. 1995. Contrasting plate-tectonic styles of the Qinling-Dabie-Sulu and Franciscan metamorphic belts [J]. *Geology* , 23 : 353 ~ 356.
- Haring M J. 2005. *Monazite EMP Geochronology—Applied to a Multi-stage Metamorphic Terrane : The Broken Hill Block , New South Wales , Australia* [D]. The Netherlands : University Utrecht.
- Kolitsch U and Holtstam D. 2004. Crystal chemistry of REEXO4 compounds (X = P , As , V). V. Review of REEXO4 compounds and their stability fields [J]. *European Journal of Mineralogy* , 16 (1) : 117 ~ 126.
- Krenn E , Ustaszewski K and Finger F. 2008. Detrital and newly formed metamorphic monazite in amphibolite-facies metapelites from the Motajica Massif , Bosnia [J]. *Chemical Geology* , 254 : 164 ~ 174.
- Liou J G , Zhang R Y , Ernst W G , *et al.* 1998. High-pressure minerals from deeply subducted metamorphic rocks [J]. *Review in Mineralogy and Geochemistry* , 37 : 33 ~ 96.
- Liou J G , Tsujimori T , Zhang R Y , *et al.* 2004. Global UHP metamorphism and continental subduction/collision : The Himalayan mode [J]. *International Geology Review* , 46 : 1 ~ 27.
- Liou J G , Zhang R Y and Ernst W G. 2007. Very high-pressure orogenic garnet peridotite [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* , 104 : 9 116 ~ 9 121.
- Liou J G , Ernst W G , Zhang R Y , *et al.* 2009. Ultrahigh-pressure minerals and metamorphic terranes—The view from China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences* , 35 : 199 ~ 231.
- Liu Shuwen , Shu Guiming , Pan Yuanming , *et al.* 2004. Electron-microprobe dating of monazite and metamorphic age of Wutai Group , Wutai Mountains [J]. *Geological Journal of China University* , 10 (3) : 356 ~ 363 (in Chinese with English abstract).
- Liu X C , Wu Y B , Gao S , *et al.* 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 [J]. *American Mineralogist* , 97 (7) : 1 083 ~ 1 093.
- Pyle J M , Spear F S and Rudnich R L. 2001. Monazite-xenotime-garnet equilibrium in metapelites and a new monazite-garnet thermometer [J]. *Journal of Petrology* , 42 : 2 083 ~ 2 107.
- Mattinson C G , Wooden J L , Liou J G , *et al.* 2006. Age and duration of eclogite-facies metamorphism , north Qaidam HP/UHP terrane , western China [J]. *American Journal of Science* , 306 : 683 ~ 701.
- Mattinson C G , Wooden J L , Zhang J X , *et al.* 2009. Paragneiss zircon geochronology and trace element geochemistry , North Qaidam HP/UHP terrane , western China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences* , 35 (3 ~ 4) : 298 ~ 309.
- Maruyama S Liou J G and Terabayashi M. 1996. Blueschists and eclogites of the world and their exhumation [J]. *International Geology Review* , 38 : 485 ~ 594.
- Montel J M , Foret S , Veschambre M C , *et al.* 1996. Electron microprobe dating of monazite [J]. *Chemical Geology* , 131 : 37 ~ 53.
- Newton R C and Haselton H T. 1981. Thermodynamics of the garnet-plagioclase-Al₂O₃-quartz geobarometer [A]. Newton R C , Navrotsky A and Wood B J. *Thermodynamics of Minerals and Melts* [C]. New York : Springer-Verlag , 131 ~ 147.
- Parrish R R and Tirrul R. 1989. U-Pb Age of the Baltoro granite , northwest Himalaya , and implications for monazite U-Pb systematics [J]. *Geology* , 17 : 1 076 ~ 1 079.
- Pyle J M and Spear F S. 1999. Yttrium zoning in garnet : coupling of major and accessory phases during metamorphic reactions [J]. *Geological Material Research* , 1 : 1 ~ 49.
- Pyle J M and Spear F S. 2000. An empirical garnet (YAG)-xenotime thermometer [J]. *Contribution to Mineral and Petrology* , 138 : 51 ~ 58.
- Pyle J M , Spear F S and Wark D A. 2002. Electron microprobe analysis of REE in apatite , monazite and xenotime : Protocols and pitfalls

- [J]. Phosphates : Geochemical , Geobiological and Materials Importance , 48 : 337~362.
- Pyle J M and Spear F S. 2003. Yttrium zoning in garnet : Coupling of major accessory phases during metamorphic reactions[J]. American Mineralogist , 88 : 708.
- Smith D C. 1984. Coesite in clinopyroxene in the caledonides and its implications for geodynamics[J]. Nature , 310 : 641~644.
- Song S G , Yang J S , Xu Z Q , et al. 2003a. Metamorphic evolution of the coesite-bearing ultrahigh-pressure terrane in the North Qaidam , Northern Tibet , NW China[J]. Journal of Metamorphic Geology , 21 : 631~644.
- Song S G , Yang J S , Liou J G , et al. 2003b. Petrology , geochemistry and isotopic ages of eclogites from the Dulan UHPM Terrane , the North Qaidam , NW China[J]. Lithos , 70 : 195~211.
- Song S G , Zhang L F and Niu Y L. 2004. Ultra-deep origin of garnet peridotite from the North Qaidam ultrahigh-pressure belt , Northern Tibetan Plateau , NW China[J]. American Mineralogist , 89 : 1 330~1 336.
- Song S G , Zhang L F , Chen J , et al. 2005a. Sodic amphibole exsolutions in garnet from garnet- peridotite , North Qaidam UHPM belt , NW China : Implications for ultradeep-origin and hydroxyl defects in mantle garnet[J]. American Mineralogist , 90 : 814~820.
- Song S G , Zhang L F , Niu Y L , et al. 2005b. 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[J]. Earth and Planetary Science Letters , 234 : 99~118.
- Song S G , Zhang L F , Niu Y L , et al. 2006. Evolution from oceanic subduction to continental collision : A case study from the Northern Tibetan Plateau based on geochemical and geochronological data[J]. Journal of Petrology , 47 : 435~455.
- Song S G , Su L , Niu Y L , et al. 2009. Two types of peridotite in North Qaidam UHPM belt and their tectonic implications for oceanic and continental subduction : A review[J]. Journal of Asian Earth Sciences , 35 : 285~297.
- Spear F S and Pyle J M. 2002. Apatite , monazite , and xenotime in metamorphic rocks[A]. Kohn M J , Rakovan J and Hughes J R. Phosphates : Geochemical , Geobiological and Materials Importance [C]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry. Washington D C : Mineralogical Society of America , 293~335.
- Suzuki K and Adachi M. 1991. Precambrian provenance and Silurian metamorphism of the Tsubonosawa paragneiss in the South Kitakami terrane , Northeast Japan , revealed by the Th-U-total Pb chemical isochron ages of monazite , zircon and xenotime[J]. Geochemical Journal , 25 : 357~376.
- Terry M P , Robinson P , Hamilton M A , et al. 2000. Monazite geochronology of UHP and HP metamorphism , deformation , and exhumation , Nord yane , Western Gneiss Region , Norway[J]. American Mineralogist , 85 : 1 651~1 664.
- Wang Q and Cong B L. 1996. Tectonic implication of UHP rocks from the Dabie Mountains[J]. Science in China Series D-Earth Sciences , 39 : 311~318.
- Williams I S. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe[A]. McKibben M A and Shanks W C. Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes[C]. Reviews in Economic Geology , 1~35.
- Williams M L , Jercinovic M J , Goncalves P , et al. 2006. Format and philosophy for collecting , compiling , and reporting microprobe monazite ages[J]. Chemical Geology , 225(1~2) : 1~15.
- Williams M L , Jercinovic M J and Hetherington C. 2007. Microprobe monazite geochronology : understanding geologic processes by integrating composition and chronology[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences , 35 : 137~175.
- Williams M , Jercinovic M and Terry M. 1999. Age mapping and dating of monazite on the electron microprobe : deconvoluting multistage tectonic histories[J]. Geology , 27 : 1 023~1 026.
- Wing B A , Ferry J M and Harrison T M. 2003. Prograde destruction and formation of monazite and allanite during contact and regional metamorphism of pelites : petrology and geochronology[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology , 145 : 228~250.
- Yang Jianjun , Zhu Hong , Deng Jinfu , et al. 1994. The discovery of garnet peridotites in northern Qaidam Mountains and its significance [J]. Acta Petrologica et Mineralogica , 13 : 97~105(in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui , Song Shuguang , Xu Zhiqin , et al. 2001. Discovery of coesite in the North Qaidam early Paleozoic ultrahigh pressure (UHP-HP) metamorphic belt , NW China[J]. Acta Geologica Sinica , 75 (2) : 175~179(in Chinese with English abstract).
- Yang J S , Liu F L , Wu C L , et al. 2005. Two ultra-high pressure metamorphic events recognized in the Central Orogenic Belt of China : evidence from the U-Pb dating of coesite-bearing zircon[J]. International Geology Review , 47 : 327~343.
- Yu S , Zhang J , Del Real P G , et al. 2012. Geochemistry and zircon U-Pb ages of adakitic rocks from the Dulan area of the North Qaidam UHP terrane , north Tibet : Constraints on the timing and nature of regional tectonothermal events associated with collisional orogeny [J]. Gondwana Research , 21(1) : 167~179.
- Yu S Y , Zhang J X , Li H K , et al. 2013. Geochemistry , zircon UPb geochronology and LuHf isotopic composition of eclogites and their host gneisses in the Dulan area , North Qaidam UHP terrane : New evidence for deep continental subduction[J]. Gondwana Research , 23(3) : 901~919.
- Zhang G B , Song S G , Zhang L F , et al. 2008. The subducted oceanic crust within continental-type UHP metamorphic belt in the North

- Qaidam, NW China: Evidence from petrology, geochemistry and geochronology[J]. *Lithos*, 104: 99–118.
- Zhang G B, Ellis D J, Christy A G, *et al.* 2009a. UHP metamorphic evolution of coesite-bearing eclogite from the Yuka terrane, North Qaidam UHPM belt, NW China[J]. *European Journal of Mineralogy*, 21: 1 287–1 300.
- Zhang G B, Zhang L F, Song S G, *et al.* 2009b. UHP metamorphic evolution and SHRIMP geochronology of a coesite-bearing metaphtolitic gabbro in the North Qaidam, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35: 310–322.
- Zhang Jianxin, Meng Fancong and Mattinson C G. 2007. Progress, controversies and challenge of studies on South Altyn Tagh-North Qaidam HP/UHP metamorphic belt[J]. *Geological Journal of China University*, 13(3): 526–545 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianxin, Meng Fancong, Li Jinping, *et al.* 2009. Coesite in eclogite from the North Qaidam Mountains and its implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(6): 1 105–1 110.
- Zhang J X, Mattinson C G, Yu S Y, *et al.* 2010. 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[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 28: 955–978.
- Zhu X K and O'Nions R K. 1999. Zonation of monazite in metamorphic rocks: A case study from the Lewisian terrane[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 171: 209–220.

附中文参考文献

- 陈丹玲, 刘良, 孙勇. 2008. 柴北缘野马滩超高压榴辉岩中副片麻岩夹层的锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 24(5): 1 059–1 067.
- 刘树文, 舒桂明, 潘元明, 等. 2004. 电子探针独居石定年法及五台群的变质时代[J]. *高校地质学报*, 10(3): 356–363.
- 杨建军, 朱红, 邓晋福, 等. 1994. 柴达木北缘石榴石橄榄岩的发现及其意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 13(2): 97–105.
- 杨经绥, 宋述光, 许志琴, 等. 2001. 柴北缘早古生代高压-超高压变质带发现典型超高压矿物——柯石英[J]. *地质学报*, 75: 175–179.
- 张建新, 孟繁聪, 李金平等. 2009. 柴达木北缘榴辉岩中的柯石英及其意义[J]. *科学通报*, 54(5): 618–623.
- 张建新, 孟繁聪, Mattinson C G. 2007. 南阿尔金-柴北缘超高压变质带研究进展、问题及挑战[J]. *高校地质学报*, 13(3): 526–545.