

doi:10.3799/dqkx.2014.110

南黄海千里岩岛榴辉岩变质演化 *P-T-t* 轨迹及其构造意义

李 敏¹, 韩宗珠^{1*}, 许 红², 赵广涛¹, 张 贺¹, 来志庆¹

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东青岛 266100

2. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266071

摘要: 南黄海千里岩岛榴辉岩对进一步深入完善大别—苏鲁造山带的研究具有重要意义。岩相学和矿物学研究显示榴辉岩主要经历了俯冲进变质(I)、峰期榴辉岩相变质(II)、角闪岩相退变质(III)和绿片岩相退变质(IV)阶段。各阶段的温压条件分别为: II阶段 $T=806.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P=3.32\text{ GPa}$; III阶段 $T=658.68\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P=0.78\text{ GPa}$; IV阶段 $T<550\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P<0.3\text{ GPa}$ 。锆石SHRIMP U-Pb测年指示千里岩岛榴辉岩的原岩形成于新元古代(约 $747\pm19\text{ Ma}$), 超高压变质作用发生在早三叠世(约 $241.1\pm1.5\text{ Ma}$), 角闪岩相退变质发生在三叠纪末(约 205.8 Ma)。在此基础上, 建立了千里岩岛榴辉岩的 *P-T-t* 演化轨迹, 反映出榴辉岩经历了2个折返阶段。这一 *P-T-t* 轨迹整体上与苏鲁地区榴辉岩类似, 指示该区所在的千里岩隆起区是苏鲁造山带在海区的延伸。

关键词: 南黄海; 榴辉岩; 矿物化学; *P-T-t* 轨迹; 苏鲁造山带

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2014)09-1289-12

收稿日期: 2014-01-08

Metamorphic *P-T-t* Path of Eclogites from Qianliyan Island in the South Yellow Sea and Its Tectonic Implications

Li Min¹, Han Zongzhu^{1*}, Xu Hong², Zhao Guangtao¹, Zhang He¹, Lai Zhiqing¹

1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China

Abstract: The eclogites in Qianliyan Island, the South Yellow Sea, is important for conducting further research of Dabie-Sulu Orogen. Petrographic and mineralogic studies reveal four main metamorphic stages, including prograde (Stage I), eclogite-facies (Stage II) metamorphism, and amphibolite-(Stage III), greenschist-facies (Stage IV) retrograde metamorphisms. The metamorphic *P-T* conditions are estimated as follows: Stage II, $T=806.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P=3.32\text{ GPa}$; Stage III, $T=658.68\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P=0.78\text{ GPa}$; Stage IV, $T<550\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P<0.3\text{ GPa}$. The SHRIMP U-Pb datings of the zircons from eclogites show that the protoliths were formed in Neoproterozoic (about $747\pm19\text{ Ma}$), the UHP metamorphism happened in Early Triassic (about $241.1\pm1.5\text{ Ma}$), and the amphibolite-facies retrograde metamorphism happened in the end of Triassic (about 205.8 Ma). Using the data mentioned above, metamorphic *PTt* path of eclogites is constructed. The *PTt* path shows that the eclogites experienced 2 stages of exhumation and reveals that the Qianliyan uplift is the extension of Sulu Orogen in the South Yellow Sea.

Key words: the South Yellow Sea; eclogite; mineral chemistry; *P-T-t* path; Sulu orogen; tectonics; Metamorphic rocks.

自许志琴首次在大别山变质岩中发现柯石英假象以来, 国内外学者对大别—苏鲁高压—超高压变质岩, 尤其是榴辉岩的岩石学、矿物学及年代学等方面进行了系统的研究, 取得了丰富的成果。地质学者

在大别—苏鲁造山带典型地区建立了榴辉岩的 *P-T-t* 演化轨迹, 指示榴辉岩的原岩形成于新元古代(徐慧芬等, 2001; Wu et al., 2004; Hacker et al., 2006; 许志琴等, 2006; 刘福来和薛怀民, 2007; 叶建

基金项目: 国家专项(No. GZH201200510-02); 国家重点基础研究发展计划“973”项目(No. 2012CB956004)。

作者简介: 李敏(1988—), 女, 博士研究生, 主要从事海洋地球化学与大陆边缘动力学研究. E-mail: liminjining@163.com

* 通讯作者: 韩宗珠, E-mail: hanzongzhu@ouc.edu.cn

国, 2008; Katube *et al.*, 2009), 经历了俯冲进变质、超高压峰期变质和折返退变质阶段 (Zhang *et al.*, 1995, 2005a; 张希道等, 1999; 叶凯等, 1999; Carswell *et al.*, 2000; 张泽明等, 2005; 石永红等, 2006a, 2006b, 2008; 刘福来和薛怀民, 2007; 叶建国, 2008; Xu *et al.*, 2009; Zong *et al.*, 2010), 超高压变质作用发生在三叠纪 (张泽明等, 2005; 刘福来和薛怀民, 2007). 榴辉岩的峰期变质温度压力通常为 700~860 °C 和 3.0~4.0 GPa (张泽明等, 2005), 最高可达 1 000~1 100 °C 和 6~7 GPa (Ye *et al.*, 2000; 张泽明等, 2005). 目前普遍认为大别—苏鲁造山带向东延伸到黄海海域 (任纪舜等, 1980; 侯泉林等, 2008), 而且在南黄海千里岩岛发现了榴辉岩的存在 (纪壮义等, 1992), 这对完善大别—苏鲁造山带研究以及华北板块和扬子板块边界划分具有重大意义. 但目前对该区榴辉岩仅进行了初步的岩相学和地球化学分析 (纪壮义等, 1992; 韩宗珠等, 2007; 李敏, 2011; 张贺, 2013), 而缺少对该区榴辉岩形成演化过程的认识. 因此本文在已有样品的基础上, 对千里岩岛榴辉岩进行详细的岩石学和矿物学研究, 并结合该区已发表的锆石定年数据, 建立了千里岩岛榴辉岩精细的 $P-T-t$ 演化轨迹, 进而讨论其俯冲折返过程.

1 地质背景

南黄海北部千里岩隆起区属于苏鲁造山带 (许志琴等, 2006), 南邻南黄海北部盆地, 二者以嘉山—响水深断裂带为界, 隆起区内部发育千里岩断裂带 (李官保等, 2011). 千里岩岛 (图 1) 是千里岩隆起在海上的出露区. 该岛主要以含石榴石花岗片麻岩、变粒岩、斜长片麻岩、构造糜棱岩等长英质岩为主, 并具有倾向南东的片理及面理 (张贺, 2013), 构造变形与青岛仰口地区一致 (Wang *et al.*, 2010). 榴辉岩出露在岛中南部的构造片麻岩中 (片麻理产状 $150^{\circ} \angle 60^{\circ}$), 主要呈透镜体状及团块状, 近东西向展布, 长约 60 cm, 最大宽度 15 cm, 风化较严重, 绿辉石多退变成透辉石+角闪石+斜长石组成的后成合晶, 但红色的石榴石仍清晰可见 (李敏, 2011).

2 岩石学和矿物学特征

2.1 岩石学特征

千里岩榴辉岩多呈深褐色, 发育中粗粒纤状粒

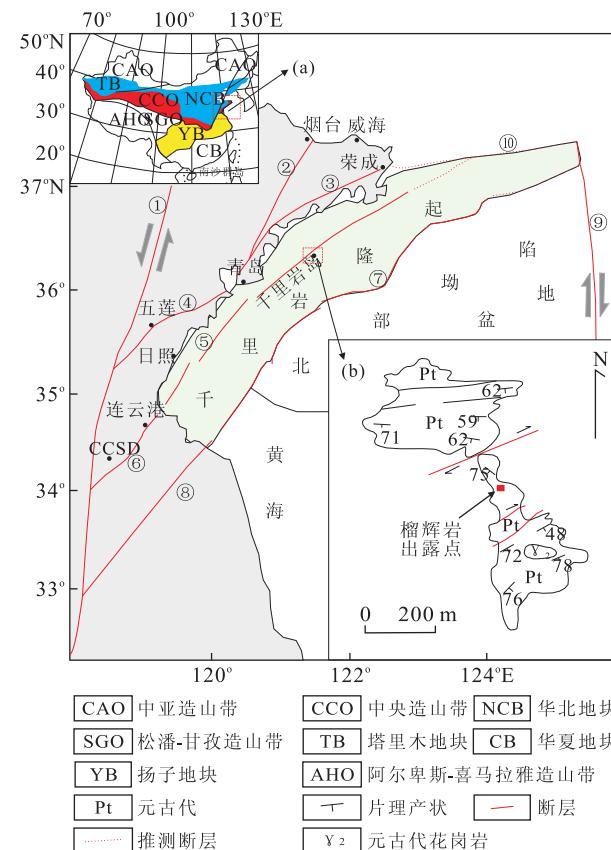


图 1 南黄海千里岩岛地质略图(据韩宗珠等, 2007; Li *et al.*, 2011; 廖晶等, 2013)

Fig. 1 Geological sketch map of Qianliyan island in the South Yellow Sea

①郯庐断裂; ②青岛—烟台断裂; ③青岛—荣成断裂; ④五莲—青岛断裂; ⑤千里岩断裂; ⑥泗阳—连云港断裂; ⑦千里岩隆起南缘断裂; ⑧嘉山—响水断裂; ⑨黄海东缘断裂; ⑩青岛—荣成断裂、千里岩断裂、千里岩南缘断裂东延推测

状变晶结构及粒状鳞片变晶结构, 片麻状构造和块状构造, 主要由石榴石 (45%~55%)、绿辉石 (10%~35%)、角闪石 (10%~20%)、多硅白云母 (3%~10%)、石英 (5%~10%)、绿泥石 (5%~10%) 和金红石 (2%) 等矿物组成. 文中矿物缩写据 Whitney and Evans (2010).

镜下观察表明, 石榴石、绿辉石和白云母平直相接, 平衡共生 (图 2a, 2b), 属于同期变质矿物. 石榴石呈淡红色, 半自形—他形粒状, 粒径粗大, 多破裂, 内部包体含量较多, 石榴石边缘常发育冠状体反应边, 成分由邻接矿物控制. 在石榴石与绿辉石之间由 Amp+Ab 组成, 而石榴石和多硅白云母之间则由 Bt+Ab 组成 (图 2c, 2f). 绿辉石多为半自形—他形, 多以变斑晶的形式存在于基质中, Di+Amp+Ab 的指纹状后成合晶十分发育 (图 2g). 多硅白云母含

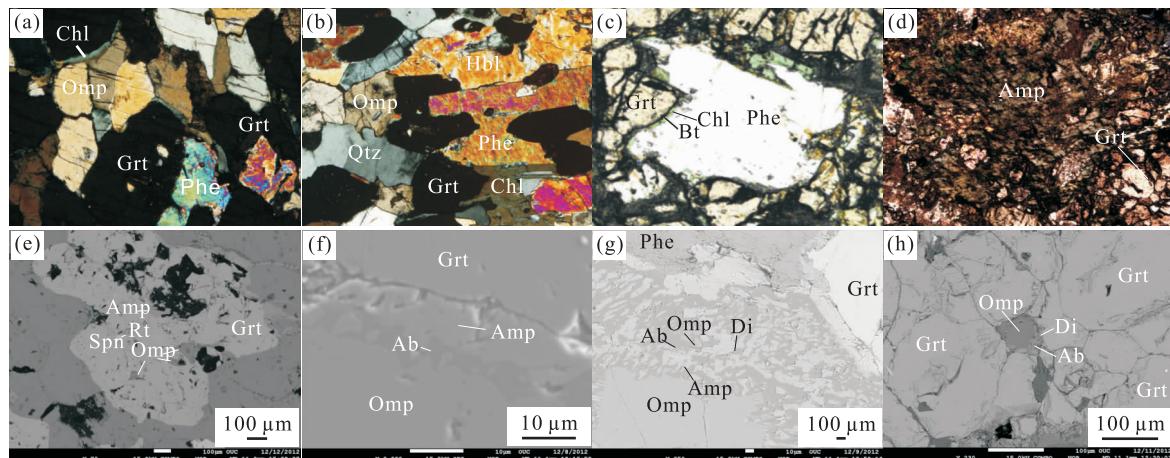


图2 榴辉岩矿物共生组合

Fig. 2 Mineral assemblage for eclogites

a、b. 正交偏光;c. 单偏光;d、e、f、g. BSE

表1 千里岩榴辉岩各变质阶段代表性矿物化学成分(%)

Table 1 The representative mineral compositions for eclogites from Qianliyan

变质阶段	I阶段			II阶段			III阶段			VI阶段		
	Grt	Omp	Ep	Grt	Omp	Phe	Amp	Ab	Di	Ep	Chl	Bt
SiO ₂	38.746	55.460	38.150	39.010	56.540	56.810	43.280	67.920	52.980	37.710	26.210	36.940
TiO ₂	0.024	0.050	22.960	0.020	0.010	0.270	0.120	0.010	0.050	22.340	0.060	0.140
Al ₂ O ₃	20.556	9.080	12.560	20.980	10.690	24.830	13.100	20.120	2.610	12.630	18.930	18.600
FeO	25.89	6.85	—	24.14	5.39	0.03	17.15	0.48	9.56	—	30.68	18.62
Cr ₂ O ₃	0.042	0.030	—	0.040	0.030	3.160	0.040	—	0.040	—	0.030	0.070
MnO	0.42	0.04	—	0.48	0.02	0.01	0.10	0.01	0.11	—	0.25	0.15
MgO	3.889	8.210	0	5.230	7.490	4.160	10.090	0.110	11.690	0.080	13.930	11.550
CaO	10.048	13.780	24.550	10.230	12.430	0	11.730	1.530	21.840	24.250	0.060	0
Na ₂ O	0.023	6.560	—	0.020	7.200	0.060	2.600	9.830	1.570	—	0.030	0.060
K ₂ O	0.012	0.020	—	—	0.010	7.980	0.460	0.050	0.020	—	0.040	8.310
总量	99.65	100.08	98.22	100.14	99.81	97.34	98.68	100.06	100.47	97.02	90.22	94.44
O	12	6	25	12	6	11	23	8	6	25	14	22
Si	3.05	1.99	6.00	3.02	2.02	3.63	6.37	2.97	1.96	6.01	2.76	5.59
Al	1.906	0.380	4.250	1.920	0.450	1.870	2.270	1.040	0.110	4.190	2.35	—
Fe ³⁺	0	0.09	1.65	0.05	0.02	—	0.43	—	0.07	1.68	—	—
Ti	0.001	0	—	0	0	0.010	0.010	0	0	—	0.010	0.020
Fe ²⁺	1.705	0.120	—	1.520	0.140	0.170	1.690	0.020	0.220	—	2.710	2.360
Cr	0.003	0	—	0	0	0	0	—	0	—	0	0.01
Mn	0.028	0	—	0.03	0	0	0.01	0	0	—	0.02	0.02
Mg	0.456	0.44	0	0.60	0.40	0.40	2.21	0.01	0.64	0.02	2.19	2.61
Ca	0.848	0.530	4.140	0.850	0.480	0	1.850	0.070	0.870	4.140	0.010	0
Na	0.004	0.450	—	0	0.500	0.010	0.740	0.830	0.110	—	0.010	0.020
K	3.040	0	—	—	0	0.650	0.090	0	0	—	0	1.61
离子数	8	4	16	8	4	6.74	15.68	4.93	4	16.04	10.06	15.54

量较少,呈半自形—自形,边缘具有Bt的退变边(图2c)。角闪石可以分为以下几种类型:①粒状变晶,该类角闪石以钠钙闪石为主,内部还残留有小的包裹体(图2b,2d);②后成合晶和反应边的角闪石,均为钙闪石(图2f,2g);③石榴石包体中的角闪石,多为钠钙闪石(图2e)。石英以变斑晶或后成合晶的形式

存在。绿帘石充填在石榴石、绿辉石、白云母和角闪石的间隙及边缘生长,或以包体形式存在于石榴石、角闪石中。金红石存在于石榴石包体和基质中,前者为早期组合,后者为普遍发育,常见于石榴石、绿辉石和多硅白云母粒间,边部常退变为钛铁矿或榍石(图2e)。黑云母主要以后成合晶或反应边的形式存

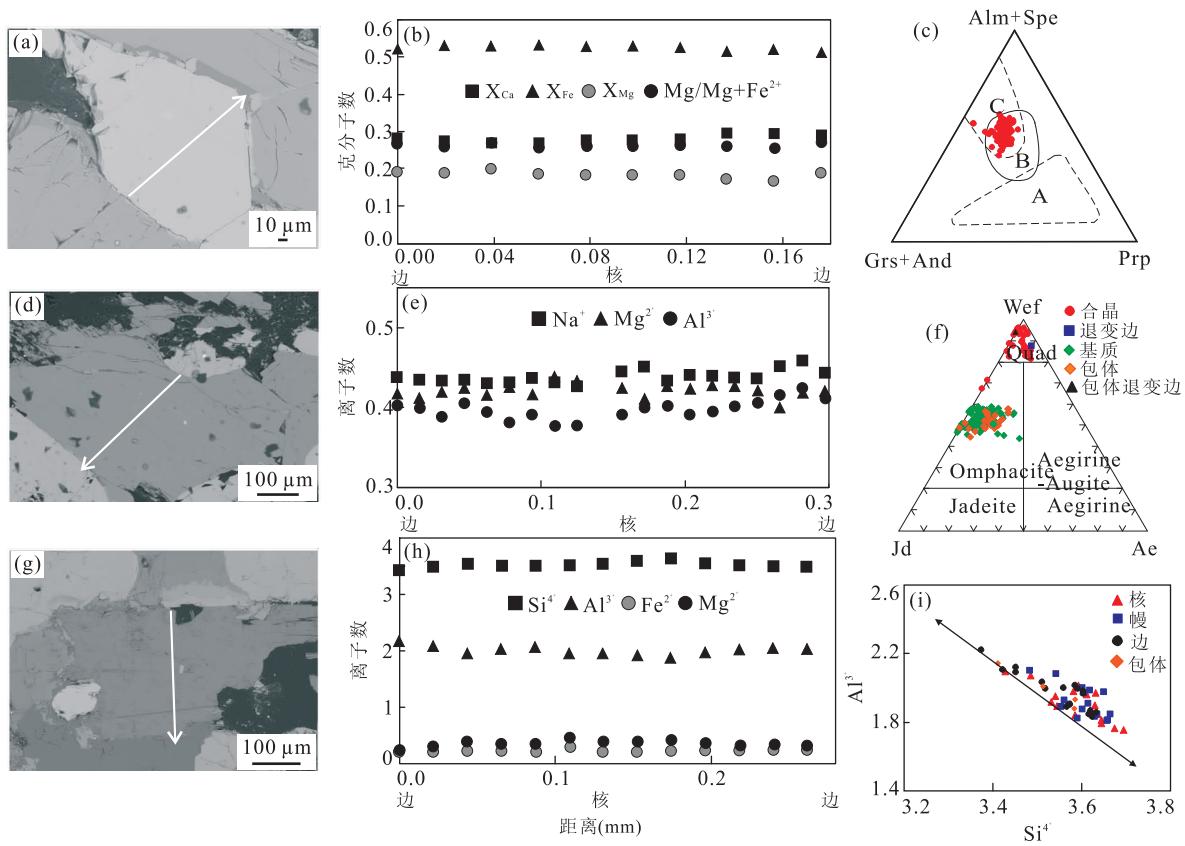


图3 千里岩岛榴辉岩主要矿物BSE、成分剖面图和成分分类

Fig. 3 BSE maps of main minerals of eclogites from Qianliyan island and the composition profile and triangle diagrams
a,b,c. 石榴石; d,e,f. 绿辉石; g,h,i. 多硅白云母. 图a,d,g中的实线为矿物成分剖面线

在于多硅白云母边缘(图2c). 绿泥石多存在于石榴石与绿辉石或多硅白云母的间隙中(图2a, 2c), 与Bt平衡共生(图2c)或以较大的叶片存在于基质中.

根据岩相学特征及矿物之间的结构关系, 该类榴辉岩具有4期变质矿物组合. I阶段: Omp+Rt+Ep, 这些矿物以包体形式存在于石榴石中; II阶段: Grt+Omp+Phe+Rt+Qtz, 以基质形式出现; III阶段: Di+Amp+Ab+Ep+Spn+Qtz, 该期矿物以石榴石、绿辉石的反应边和绿辉石的后成合晶为代表; IV阶段: Chl+Bt+Qtz, 这些矿物主要沿矿物裂隙或边缘生长.

2.2 矿物学化学特征

千里岩榴辉岩的矿物分析测试在中国海洋大学海洋地球科学学院电子探针分析实验室完成, 仪器型号为JEOL, 工作条件: 加速电压为15 kV, 电子束流为 2×10^{-8} A. 矿物分析数据见表1, 其中石榴石和绿辉石中 Fe^{2+} 含量采用电价平衡法, 角闪石中的 Fe^{2+} 含量调整采用13 CNK方法($\text{Si} + \text{Al} + \text{Ti} + \text{Mg} + \text{Fe} + \text{Mn} = 13$).

2.2.1 石榴石 石榴石成分主要由 Alm(39.4%~

57.8%)、Prp(5.3%~25.8%)、Grs(15.4%~38.5%)、Adr(0%~11.5%)、Sps(0.6%~6.5%)这5个端元组成. 石榴石(图3a)成分剖面图(图3b)展现了不明显的环带特征, 核部较为平坦, 说明核部成分相对均一; 向边部 X_{Ca} 轻微上升, X_{Fe} 轻微下降, X_{Mg} 及 $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ 基本没有变化. 在石榴石成分三角图中, 石榴石均投影在C类榴辉岩中(Lovering *et al.*, 1969)(图3c).

2.2.2 绿辉石 基质中的绿辉石(图3d)成分剖面(图3e)具有成分环带特征. 由核部向幔部 Na^+ 、 Al^{3+} 逐渐上升, Mg^{2+} 逐渐下降; 幔部向边部 Na^+ 、 Al^{3+} 下降, 而 Mg^{2+} 上升. 另外绿辉石的Jd值也存在类似的变化特征, 说明绿辉石在边部发生了退变质作用. Jd含量由核部的46%降低到后成合晶中的5%~15%, 说明绿辉石经历了多次的分解退变.

2.2.3 多硅白云母 在BSE图中, 多硅白云母(图3g)没有颜色的变化, 表明其成分相对均匀, 但在成分剖面图中(图3h)显示具有微弱的成分环带特征. 由核部向边部 Si^{4+} 、 Mg^{2+} 逐渐降低, Al^{3+} 逐渐上升, Fe^{2+} 相对平稳, 反映了压力降低的变化规律

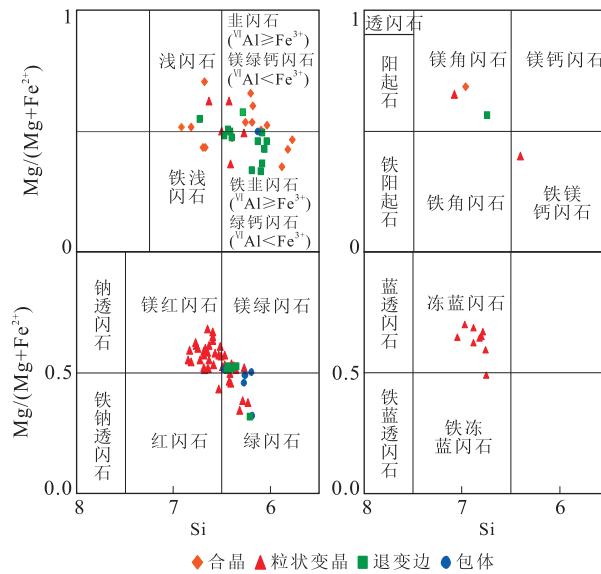
图 4 角闪石分类(Leake *et al.*, 1997)

Fig. 4 Amphibole composition classification

(Massonne and Schreyer, 1987),说明多硅白云母幔边部为后期退变的产物。

2.2.4 角闪石 角闪石是千里岩岛榴辉岩中主要的退变质矿物,呈蓝绿色,多色性明显(图 2d)。角闪石的 Na_{B} 和 Ca_{B} 分别为 0~0.792 和 1.208~2,钙质、钠钙质角闪石均存在(图 4)。包体中的角闪石主要为绿闪石;基质中以粒状变晶形式存在的主要是镁红闪石;浅闪石和韭闪石通常在后成合晶和退变边中出现。这些角闪石形成于不同的变质条件下,属于不同变质阶段的产物。对不同类型角闪石的分析发现,随着温压条件的降低,钠钙质角闪石有逐渐向钙质角闪石转化的趋势。

3 温压条件估算

根据确定的 4 期变质矿物组合,笔者应用不同的地质温压计对各变质阶段的 PT 条件进行定量估算。

(1) I 阶段由于具有 Omp+Rt+Ep 组合,说明榴辉岩应该经历了进变质作用。但从石榴石成分环带特征看(图 3b),石榴石核部已被重新平衡,不能代表进变质时期的石榴石成分,因此该阶段的温压条件无法估算。

(2) II 阶段矿物组合为 Grt+Omp+Phe+Rt,代表峰期变质阶段,因此笔者选择石榴石高 X_{Mg} 部分(Carswell *et al.*, 1997)、绿辉石高 Jd 部分(Holland, 1980)和多硅白云母高 Si^{4+} 部分(Massonne

and Schreyer, 1987)作为峰期组分,这些组分可以代表峰期榴辉岩的相变成分。根据陈意等(2005)的论述,对于该阶段的温压估算笔者应用 Ravna (2000) 的 Grt-Cpx 温度计和 Waters and Martin (1993) 的 Grt-Cpx-Phe 压力计。对选取的 13 个 Grt-Omp-Phe 矿物对进行了计算,该阶段平均温压分别为 806.3 °C 和 3.32 GPa,与前人对苏鲁地体估算的超高压变质温压条件基本一致(Zhang *et al.*, 1995, 2000; 叶建国, 2008)。

(3) III 阶段以石榴石、绿辉石的 Amp 退变边,保留辉石假象的 Amp+Ab 粒状变晶及取代辉石的 Di+Amp+Ab 蠕虫状后成合晶为特征。该阶段的温压条件可以利用 Amp-Pl 温度计(Holland and Blundy, 1994)和 Amp 压力计(Schmidt, 1992)计算,平均温压条件为 658.68 °C 和 0.78 GPa,与前人估算的角闪岩相退变阶段温压条件十分接近(Liou *et al.*, 1997; Zhang *et al.*, 2003; 刘福来等, 2006; 叶建国, 2008)。

(4) IV 阶段没有合适的矿物对和温压计可以利用,仅根据该变质阶段的矿物组合(Bt+Chl)确定其经历了绿片岩相变质作用,温压条件推测为: $T < 550$ °C, $P < 0.3$ GPa。

4 锆石 SHRIMP U-Pb 定年

本文对具有代表性的 30 个锆石颗粒 32 个不同性质微区进行 SHRIMP U-Pb 定年测试,所有测试数据列入表 2 中。锆石多为不规则粒状,表面圆化,结合阴极发光图像显示的特征(图 5),锆石可以分为 2 类,第 1 类锆石为短柱状,长宽比约 2:1,具有核一边双层结构,核部具有韵律环带,而边部具冷杉树状环带;第 2 类锆石为浑圆粒状,长宽比约 1:1,内部结构呈明暗斑杂状。第 1 类锆石的核部 Th/U 值为 0.41~1.44,为岩浆锆石;而其边部与第 2 类锆石的(核部还是边部?)Th/U 值为 0.01~0.3,为变质成因锆石。

岩浆锆石中记录的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 最新年龄为 416.7 Ma,最老年龄为 768.3 Ma,且 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值老于 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,说明岩浆锆石来源比较复杂并经历了超高压变质及后期退变质热事件的改造(周开富, 2004),因此岩浆锆石中记录的最新年龄不能代表榴辉岩原岩的形成年龄。在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 图解中,所有锆石分析测试点均落在谐和线上或落在谐和线下方,上交点年龄为 747 ±

表2 榴辉岩单颗粒锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果
Table 2 SHRIMP U-Pb dating of single zircons of eclogites

点号	U (10^{-6})	Th (10^{-6})	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	误差 (%)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	误差 (%)	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$	误差 (%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Age(Ma)	误差 (%)	
QLY-1-1.1	210	11	0.05	6.7	26.87	1.4	0.0583	2.7	0.28	3.4	234.6	3.3
QLY-1-2.1	312	217	0.72	19.7	13.60	1.1	0.0635	1.4	0.61	2.7	455.5	5.0
QLY-1-3.1	479	375	0.81	52.0	7.92	1.1	0.0663	0.9	1.15	1.4	766.5	7.9
QLY-1-3.2	436	19	0.04	14.7	25.42	1.2	0.0717	2.6	0.27	8.0	242.8	3.1
QLY-1-4.1	148	148	1.03	15.8	8.05	1.3	0.0684	1.6	1.11	2.9	751.9	9.0
QLY-1-4.2	812	976	1.24	83.2	8.38	1.1	0.0641	0.7	1.05	1.3	726.8	7.3
QLY-1-5.1	306	5	0.02	10.2	25.89	1.2	0.0591	2.5	0.29	3.8	243.2	2.8
QLY-1-6.1	350	12	0.04	11.3	26.65	1.2	0.0571	2.0	0.26	4.9	235.5	2.8
QLY-1-7.1	513	11	0.02	17.6	25.10	1.6	0.0556	1.7	0.29	3.5	250.8	4.0
QLY-1-8.1	597	49	0.08	19.6	26.18	1.1	0.0555	1.5	0.29	2.2	241.3	2.7
QLY-1-9.1	349	413	1.22	38.0	7.89	1.1	0.0666	1.0	1.15	1.6	768.3	8.2
QLY-1-10.1	327	17	0.05	10.6	26.54	1.2	0.0576	3.0	0.28	4.7	237.2	2.8
QLY-1-11.1	431	17	0.04	14.3	25.94	1.3	0.0575	2.5	0.27	4.7	242.0	3.1
QLY-1-12.1	215	6	0.03	7.2	25.56	1.2	0.0598	5.2	0.28	8.1	245.4	3.1
QLY-1-13.1	320	404	1.30	33.3	8.26	1.1	0.0638	1.1	1.04	1.8	736.0	7.7
QLY-1-14.1	278	4	0.02	9.2	25.98	1.2	0.0572	3.8	0.27	5.9	241.8	2.9
QLY-1-15.1	192	115	0.62	11.6	14.17	1.2	0.0660	1.8	0.58	4.4	436.4	5.3
QLY-1-16.1	242	4	0.02	8.1	25.64	1.8	0.0598	3.8	0.27	7.2	244.2	4.5
QLY-1-17.1	305	88	0.30	11.7	22.45	1.2	0.0601	2.0	0.35	3.2	280.0	3.3
QLY-1-18.1	276	20	0.07	10.1	23.44	1.2	0.0582	2.1	0.32	3.6	268.4	3.1
QLY-1-19.1	218.1	213.2	1.01	125.3	14.95	1.0	0.0610	0.6	0.55	1.6	416.7	4.2
QLY-1-20.1	343	19	0.06	11.2	26.42	1.3	0.0563	2.3	0.27	4.0	238.5	3.0
QLY-1-21.1	347	23	0.07	11.2	26.58	1.2	0.0592	3.2	0.28	4.9	236.7	2.8
QLY-1-22.1	254	13	0.05	7.1	30.52	1.2	0.0553	2.4	0.21	6.5	205.8	2.5
QLY-1-23.1	430	27	0.06	14.3	25.86	1.1	0.0552	2.1	0.26	2.8	242.7	2.7
QLY-1-24.1	487	26	0.05	16.4	25.54	1.1	0.0560	1.7	0.27	4.1	245.8	2.8
QLY-1-25.1	267	5	0.02	8.8	26.20	1.2	0.0550	2.2	0.27	4.2	240.3	2.8
QLY-1-26.1	196	79	0.41	15.2	11.05	1.3	0.0679	1.8	0.81	2.8	556.7	7.1
QLY-1-27.1	295	4	0.01	9.6	26.37	1.3	0.0592	3.0	0.27	5.3	238.1	3.0
QLY-1-28.1	255	7	0.03	8.3	26.31	1.6	0.0572	3.1	0.26	6.1	238.6	3.8
QLY-1-29.1	384	535	1.44	40.1	8.24	1.1	0.0671	1.0	1.07	1.9	736.2	7.8
QLY-1-30.1	340	453	1.38	33.4	8.77	1.5	0.0650	1.1	0.98	2.2	694.4	10.2

注:锆石 SHRIMP U-Pb 测试在北京离子探针中心完成。

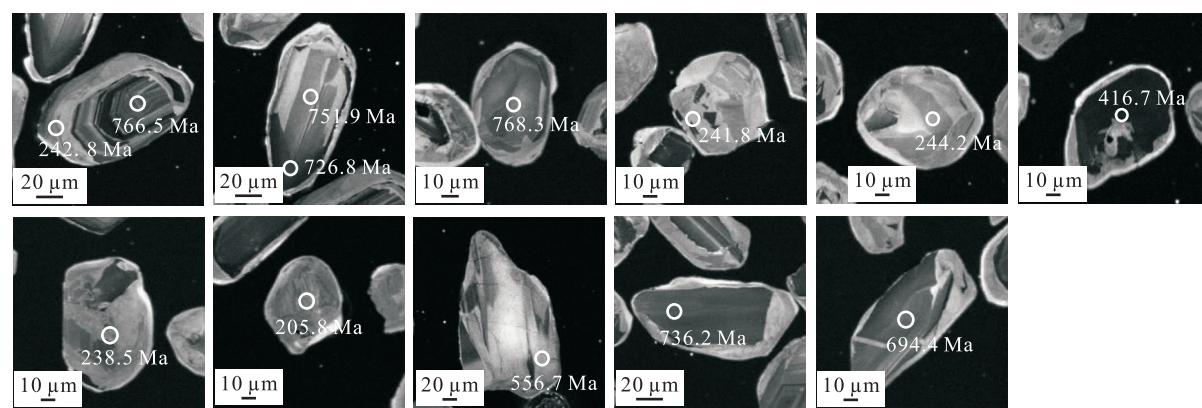


图5 榴辉岩部分锆石高清阴极发光图像、测点位置和测年结果

Fig. 5 Cathode luminescence photo micrographs, measure points and dating results of zircons

19 Ma(图6a),与千里岩岛片麻岩锆石记录的上交点年龄(775.5 ± 6.3 Ma)非常吻合(张贺,2013),且

与苏鲁其他地区榴辉岩的原岩形成年龄一致(表3,Liu et al., 2004a, 2004b, 2005, 2007; Zheng

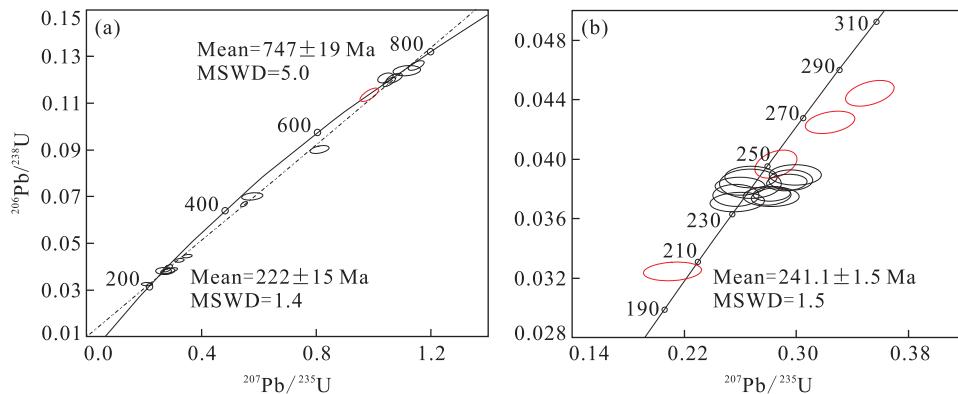


图 6 榴辉岩单颗粒锆石 SHRIMP U-Pb 年龄谐和图

Fig. 6 Single zircon SHRIMP U-Pb Concordia diagram for eclogites

表 3 苏鲁超高压变质带榴辉岩中锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果

Table 3 SHRIMP U-Pb dating for zircons from UHP metamorphic rocks in Sulu terrane

样品号	地点	围岩类型	岩浆锆石年龄 (Ma)	超高压变质年龄 (Ma)	角闪岩相退变质年龄 (Ma)	参考文献
H2	三清阁	大理岩	—	231~238 234±4	210~220 214±4	Liu <i>et al.</i> , 2007
CT1	池塘	正片麻岩	650~795	226~236 231±3	—	
ZC	诸城	正片麻岩	710~812	223~229 227±2	—	
LSD-1	岚山头	正片麻岩	682~810	227~238 233±4	205~217 209±3	刘福来和薛怀民,2007
YK01	仰口	正片麻岩	652~796	222~230 226±3	201~214 207±2	
B42	钻孔 MH	正片麻岩	682~820	224~238 232±3	211~217 214±5	
QL-Y-1	千里岩岛	副片麻岩	416~770	241.1±1.5	205.8	本文

et al., 2004, 2006; Zhang *et al.*, 2005b), 说明千里岩岛榴辉岩的原岩形成于新元古代。虽然榴辉岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄谐和图中下交点年龄为 222±15 Ma, 但变质成因锆石中记录的 241.1±1.5 Ma 的加权平均年龄应更能准确的代表超高压变质年龄。而且 Liu *et al.* (2009) 认为苏鲁地区不同岩片的超高压变质时代并不一致, 高压岩片的超高压变质年龄(245 Ma)早于超高压岩片 II (228 Ma)。千里岩岛榴辉岩位于苏鲁超高压地体靠近高压地体的部位, 其超高压变质时代稍早于苏鲁其他地区榴辉岩(中晚三叠世), 这可能是受到高压岩片俯冲的影响。锆石中记录的 205.8 Ma 年龄与三清阁、岚山头、仰口及 CCSD-MH 榴辉岩的角闪岩相退变质年龄非常接近(Liu *et al.*, 2007), 应代表角闪岩相退变质的年龄。

5 榴辉岩 P-T-t 轨迹及其地质意义

千里岩岛榴辉岩的 P-T-t 演化轨迹显示榴辉岩的原岩(形成于新元古代, 约 747±19 Ma)于早三叠世(约 241.1±1.5 Ma)发生榴辉岩相超高压变质作用, 相当于俯冲到 100~120 km 的地幔深处。千里岩

榴辉岩的折返过程可划分为 2 个阶段。Ⅱ 至 Ⅲ 阶段为第 1 阶段, 有大量角闪石和绿帘石等含水矿物出现, 说明该阶段有流体活动的参与, 角闪岩相退变质发生在三叠纪末(约 205.8 Ma); Ⅱ 阶段至 Ⅲ 阶段温压分别下降约 147.6 °C 和 2.5 GPa, 相当于折返至 20~40 km 的深度。Ⅲ 至 Ⅳ 阶段为第 2 阶段, 温压分别下降约 100 °C 和 0.48 GPa, 相当于折返到地下约 10 km 处。不同折返阶段代表了不同的构造事件, 第 1 折返阶段年龄(241.1±1.5 Ma~205.8 Ma)与大别山超高压变质岩第 1 次快速冷却事件结束时代一致, 说明该阶段与俯冲板片断离有关(李曙光等, 2005); 第 2 折返阶段显示了一个相对缓慢的抬升过程, 由于上覆岩层的阻挡, 抬升只能在岩浆的上拱作用下缓慢进行(Wang and Cong, 1996, 1999)。

世界上绝大多数榴辉岩的 PT 轨迹都是一个顺时针的拉长曲线, 退变质过程为近等温降压或减压降温(Jamtveit, 1987)。将苏鲁造山带典型地区(图 7b)榴辉岩的 PT 轨迹总结对比后, 笔者发现较为完整的榴辉岩变质演化 PT 轨迹均具有顺时针演化的趋势, 进变质阶段温压明显增加达到峰值温度和压力, 之后经历减压降温过程。千里岩地区榴辉岩 PT 轨迹整体上与苏鲁地区榴辉岩类似(图 7a), 而且锆

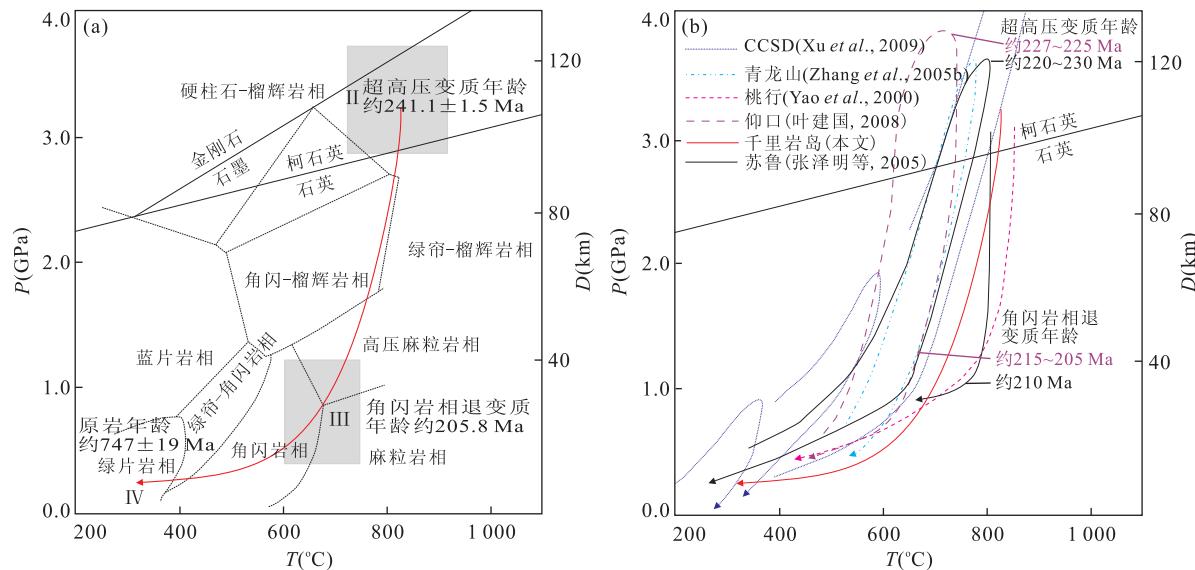


图7 千里岩榴辉岩(a)及苏鲁地区(b)变质演化P-T-t轨迹

Fig. 7 P-T-t path of eclogites from Qianliyan and Sulu orogenic belt

石中记录的年代学特征与苏鲁地区榴辉岩的变质年龄较为吻合,因此该区所在的千里岩隆起区应该是苏鲁造山带在海区的延伸。

6 结论

(1)岩石学、矿物学研究表明,千里岩榴辉岩经历了4个变质阶段,笔者通过对各阶段变质矿物组合的成分分析,选取合适的温压计,估算各变质阶段的温压条件分别为:Ⅱ阶段 $T=806.3^{\circ}\text{C}$, $P=3.32\text{ GPa}$;Ⅲ阶段 $T=658.68^{\circ}\text{C}$, $P=0.78\text{ GPa}$;Ⅳ阶段 $T<550^{\circ}\text{C}$, $P<0.3\text{ GPa}$ 。

(2)基于锆石的SHRIMP U-Pb年龄分析,千里岩榴辉岩的原岩形成于元古代(约 $747\pm19\text{ Ma}$),超高压变质作用发生在 $241.1\pm1.5\text{ Ma}$,角闪岩相退变质时间约为 205.8 Ma 。

(3)千里岩榴辉岩顺时针的P-T-t演化轨迹反映榴辉岩经历了2个折返阶段,第1折返阶段与俯冲板片断离有关;第2折返阶段在岩浆的上拱作用下缓慢抬升。千里岩榴辉岩P-T-t轨迹指示千里岩隆起区是苏鲁造山带在海区的延伸。

致谢:本文依托“南黄海油气资源评价技术及其应用研究”子项目“下扬子前陆盆地成因特征与盆山耦合关系研究”。中国地质调查局青岛海洋地质研究所科技处和实验中心为本项目的开展给予了大力支持和帮助,作者在此深表感谢!

References

- Carswell, D. A., O'Brien, P. J., Wilson, R. N., et al., 1997. Thermobarometry of Phengite-Bearing Eclogites in the Dabie Mountains of Central China. *J. Metamorphic Geol.*, 15: 239—252. doi: 10.1111/j.1525-1314.1997.00014.x
- Carswell, D. A., Wilson, R. N., Zhai, M. G., 2000. Metamorphic Evolution, Mineral Chemistry and Thermobarometry of Schists and Orthogneiss Hosting Ultra-High Pressure Eclogites in the Dabieshan of Central China. *Lithos*, 52(1—4): 121—155. doi: 10.1016/S0024-4937(99)00088-2
- Chen, Y., Ye, K., Wu, C. M., 2005. Reviews on Applying Common-Used Geothermobarometers for Eclogites. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4): 1067—1080 (in Chinese with English abstract).
- Hacker, B. R., Wallis, S. R., Ratschbacher, L., et al., 2006. High-Temperature Geochronology Constraints on the Tectonic History and Architecture of the Ultrahigh-Pressure Dabie-Sulu Orogen. *Tectonics*, 25(5): 1—17. doi: 10.1029/2005TC001937
- Han, Z. Z., Xiao, Y., Yu, H., et al., 2007. A Study on the Mineral Chemistry and Genesis of the Eclogite from Qianliyan Island, the Southwestern Huanghai Sea. *Transactions of Oceanology and Limnology*, (1): 83—87 (in Chinese with English abstract).
- Holland, T., 1980. The Reaction Albite=Jadeite+Quartz Determined Experimentally in the Range 600—1 200 °C. *American Mineralogist*, 65: 239—134.
- Holland, T., Blundy, J., 1994. Non-Ideal Interactions in Cal-

- cic Amphiboles and Their Bearing on Amphibole-Plagioclase Thermometry. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 116:433—447. doi:10.1007/BF00310910
- Hou, Q. L. , Wu, Y. D. , Wu, F. Y. , et al. , 2008. Possible Tectonic Manifestations of the Dabie-Sulu Orogenic Belt on the Korean Peninsula. *Geological Bulletin of China* , 27(10): 1659 — 1666 (in Chinese with English abstract).
- Jamtveit, B. , 1987. Metamorphic Evolution of the Eiksunddal Eclogite Complex, Western Norway, and Some Tectonic Implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology* , 95:82—99. doi:10.1007/BF00518032
- Ji, Z. Y. , Zhao, H. J. , Zhao, G. H. , 1992. Eclogite Growth in Qianliyan Island, Yellow Sea. *Geology of Shandong* , 8(2):1 (in Chinese).
- Katsube, A. , Hayasaka, Y. , Santosh, M. , et al. , 2009. SHRIMP Zircon U-Pb Ages of Eclogite and Orthogneiss from Sulu Ultrahigh-Pressure Zone in Yangkou Area, Eastern China. *Gondwana Research* , 15: 168 — 177. doi:10.1016/j.gr.2008.08.002
- Leake, B. E. , Woolley, A. R. , Birch, W. D. , et al. , 1997. Nomenclature of Amphiboles, Report of Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. *The Canadian Mineralogist* , 35:219—246.
- Li, G. B. , Liu, B. H. , Zhao, Y. X. , et al. , 2011. Quaternary Tectonic Activity near the Qianliyan Island of Southern Yellow Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences* , 36(6):977—984 (in Chinese with English abstract).
- Li, M. , 2011. The Basement Features and Dynamic Evolution Mechanism of the Qianliyan Uplift, South Yellow Sea—Evidence from Petrology and Geochemistry of Eclogites (Dissertation). Ocean University of China, Qingdao (in Chinese with English abstract).
- Li, S. G. , Li, Q. L. , Hou, Z. H. , et al. , 2005. Cooling History and Exhumation Mechanism of the Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks in the Dabie Mountains, Central China. *Acta Petrologica Sinica* , 21(4):1117—1124 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. Z. , Kusky, T. M. , Zhao, G. C. , et al. , 2011. Thermo-chronological Constraints on Two-Stage Extrusion of HP/UHP Terranes in the Dabie-Sulu Orogen, Eastern-Central China. *Tectonophysics* , 504: 25 — 42. doi: 10.1016/j.tecto.2011.01.017
- Liao, J. , Yue, B. J. , Shi, J. , 2013. Extension of Qianliyan Uplift in the South Yellow Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology* , 33(2): 153 — 162 (in Chinese with English abstract).
- Liou, J. G. , Zhang, R. Y. , Jahn, B. , et al. , 1997. Petrology, Geochemistry and Isotope Data on a Ultrahigh-Pressure Jadeite Quartzite from Shuanghe, Dabie Mountains, East-Central China. *Lithos* , 41: 59 — 78. doi: 10.1016/S0024-4937(97)82005-1
- Liu, F. L. , Liou, J. G. , Xu, Z. Q. , et al. , 2005. U-Pb SHRIMP Ages Recorded in the Coesite-Bearing Zircon Domains of Paragneisses in the Southwestern Sulu Terrane, Eastern China, New Interpretation. *American Mineralogist* , 90: 790 — 800. doi: 10.2138/am.2005.1677
- Liu, F. L. , Xu, Z. Q. , Liou, J. G. , et al. , 2004a. SHRIMP U-Pb Ages of Ultrahigh-Pressure and Retrograde Metamorphism of Gneisses, Southwestern Sulu Terrane, Eastern China. *Journal of Metamorphic Geology* , 22: 315—326. doi:10.1111/j.1525-1314.2004.00516.x
- Liu, F. L. , Xu, Z. Q. , Xue, H. M. , 2004b. Tracing the Protolith, UHP Metamorphism and Exhumation Ages of Orthogneiss from the SW Sulu Terrane (Eastern China), SHRIMP U-Pb Dating of Mineral Inclusion-Bearing Zircons. *Lithos* , 78: 411 — 429. doi: 10.1016/j.lithos.2004.08.001
- Liu, F. L. , Gerdes, A. , Robinson, P. T. , et al. , 2007. Zoned Zircon from Eclogite Lenses in Marbles from the Dabie-Sulu UHP Terrane, China, A Clear Record of Ultra-Deep Subduction and Fast Exhumation. *Acta Geologica Sinica* , 81(2):204 — 225. doi:10.1111/j.1755-6724.2007.tb00945.x
- Liu, F. L. , Gerdes, A. , Xue, H. M. , 2009. Differential Subduction and Exhumation of Crustal Slices in the Sulu HP-UHP Metamorphic Terrane: Insights from Mineral Inclusions, Trace Elements, U-Pb and Lu-Hf Isotope Analyses of Zircon in Ortho-Gneiss. *J. Metamorphic Geol.* , 27:805—825. doi:10.1111/j.1525-1314.2009.00833.x
- Liu, F. L. , Xue, H. M. , 2007. Review and Prospect of SHRIMP U-Pb Dating on Zircons from Sulu-Dabie UHP Metamorphic Rocks. *Acta Petrologica Sinica* , 23(11):2737—2756 (in Chinese with English abstract).
- Liu, F. L. , Xue, H. M. , Xu, Z. Q. , et al. , 2006. SHRIMP U-Pb Zircon Dating from Eclogite Lens in Marble, Shuanghe Area, Dabie UHP Terrane: Restriction on the Prograde, UHP and Retrograde Metamorphic Ages. *Acta Petrologica Sinica* , 22(7):1761 — 1778 (in Chinese with English abstract).
- Lovering, J. F. , White, A. J. R. , 1969. Granulitic and Eclogite Inclusions from Basic Pipes at Delegate, Australia. *Con-*

- trib. Mineral. Petrol.*, 21(1): 9—52. doi: 10.1007/BF00377416
- Massone, H. J., Schreyer, W., 1987. Phengite Geobarometry Based on the Limiting Assemblage with K-Feldspar, Phlogopite, and Quartz. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 96: 212—224. doi: 10.1007/BF00375235
- Ravna, E. J., 2000. The Garnet-Clinopyroxene Fe^{2+} -Mg Geothermometer: An Updated Calibration. *J. Metamorphic Geol.*, 18: 211—219. doi: 10.1046/j.1525—1314.2000.00247.x
- Ren, J. S., Jiang, C. F., Zhang, Z. K., et al., 1980. The Geotectonic Evolution of China. Science Press, Beijing, 108—110 (in Chinese).
- Schmidt, M. W., 1992. Amphibole Composition in Tonalite as a Function of Pressure: An Experimental Calibration of the Al-In-Hornblende Barometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 110: 304—310. doi: 10.1007/BF00310745
- Shi, Y. H., Lin, W., Wang, Q. C., 2008. The P - T Path with Increasing Temperature during Retrograde Metamorphism for the Low-Temperature and High-Pressure Eclogites from Leizhuang across Tongcheng Area in Dabie Mountains and Its Tectonic Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1759—1770 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Y. H., Wang, Q. C., 2006. Precise P - T Path and Multi-Stage Exhumation of the Jinheqiao Eclogite, Dabie Mountains, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12): 2850—2860 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Y. H., Wang, Q. C., Lin, W., 2006. The Characteristic of Petrology, Minerals Chemistry and P - T Conditions of Eclogites from Taihu Area in Dabie Mountains, and Its Tectonic Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 414—432 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L., Kusky, T. M., Li, S. Z., 2010. Structural Geometry of an Exhumed UHP Terrane in the Eastern Sulu Orogen, China: Implications for Continental Collisional Processes. *Journal of Structural Geology*, 32: 423—444. doi: 10.1016/j.jsg.2010.01.012
- Wang, Q. C., Cong, B. L., 1996. Tectonic Implication of UHP Rocks from the Dabie Mountains. *Science in China (Series D)*, 39(3): 311—318.
- Wang, Q. C., Cong, B. L., 1999. Exhumation of UHP Terranes: A Case Study from the Dabie Mountains, Eastern China. *International Geology Review*, 41: 994—1004. doi: 10.1080/00206819909465185
- Waters, D. J., Martin, H. N., 1993. Geobarometry of Phengite-Bearing Eclogite. *Terra Abstracts*, 5: 410—411.
- Whitney, D. L., Evans, B. W., 2010. Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. *American Mineralogist*, 95: 185—187. doi: 10.2138/am.2010.3371
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., Zhou, J., 2004. Neoproterozoic Granitoid in Northwest Sulu and Its Bearing on the North China-South China Blocks Boundary in East China. *Geophysical Research Letters*, 31: 1—4. doi: 10.1029/2004GL019785
- Xu, H. F., Yang, T. N., Liu, F. L., et al., 2001. Multi Age-Time Evolution of Granite Gneisses-Granite in the Southern Sulu HP-UHP Metamorphic Belt. *Acta Geologica Sinica*, 75(3): 371—378 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Yang, W. C., Ji, S. C., et al., 2009. Deep Root of a Continent-Continent Collision Belt, Evidence from the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Deep Borehole in the Sulu Ultrahigh-Pressure (HP-UHP) Metamorphic Terrane, China. *Tectonophysics*, 475: 204—219. doi: 10.1016/j.tecto.2009.02.029
- Xu, Z. Q., Liu, F. L., Qi, X. X., et al., 2006. Record for Rodinia Supercontinent Breakup Event in the South Sulu Ultra-High Pressure Metamorphic Terrane. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7): 1745—1760 (in Chinese with English abstract).
- Yao, Y. P., Ye, K., Liu, J. B., 2000. A Transitional Eclogite-to High Pressure Granulite-Facies Overprint on Coesite-Eclogite at Taohang in the Sulu Ultrahigh-Pressure Terrane, Eastern China. *Lithos*, 52: 109—120. doi: 10.1016/S0024—4937(99)00087—0
- Ye, J. G., 2008. Transformatin and P - T - t Path of Gabbro to Coesite-Bearing Eclogite from Yangkou in the Sulu UHP Terrane (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 42—64 (in Chinese with English abstract).
- Ye, K., Cong, B. L., Ye, D. N., 2000. The Possible Subduction of Continental Material to Depths Greater than 200 km. *Nature*, 407(12): 734—736. doi: 10.1038/35037566
- Ye, K., Cong, B. L., Takao, H., et al., 1999. Transformation from Granulite to Transitional Eclogite at Haiyangsu, Rushan County, Eastern Shandong Peninsula: The Kinetic Process and Tectonic Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 15(1): 21—36 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H., 2013. Dynamic Processes of the Foreland Basin of the South Yellow Sea and Bain-Range Coupling Relationship (Dissertation). Ocean University of China, Qingdao, 5—48 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R. Y., Hirajima, T., Banno, S., et al., 1995. Petrolo-

- gy of Ultrahigh-Pressure Rocks from the Southern Sulu Region, Eastern China. *J. Metamorphic Geol.*, 13: 659—675. doi: 10.1111/j.1525-1314.1995.tb00250.x
- Zhang, R. Y., Liou, J. G., Zheng, Y. F., et al., 2003. Transition of UHP Eclogites to Gneissic Rocks of Low-Amphibolite Facies during Exhumation, Evidence from the Dabie Terrane, Central China. *Lithos*, 70: 269—291. doi: 10.1016/S0024-4937(03)00102-6
- Zhang, R. Y., Yang, J. S., Wooden, J. L., et al., 2005. U-Pb SHRIMP Geochronology of Zircon in Garnet Peridotite from the Sulu UHP Terrane, China, Implications for Mantle Metasomatism and Subduction-Zone UHP Metamorphism. *Earth and Planetary Science Letters*, 237: 729—743. doi: 10.1016/j.epsl.2005.07.003
- Zhang, X. D., Wang, S. G., Liu, J. W., et al., 1999. PTt Path of Metamorphism of Lanshantou Eclogite in Southeastern Shandong and Its Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 15(1): 37—47 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. M., Xu, Z. Q., Zu, H. F., et al., 2000. Petrology of Ultrahigh Pressure Eclogite from the ZK703 Drillhole in the Donghai, Eastern China. *Lithos*, 52: 35—50. doi: 10.1016/S0024-4937(99)00083-3
- Zhang, Z. M., Xiao, Y. L., Liu, F. L., et al., 2005. Petrogenesis of UHP Metamorphic Rocks from Qinglongshan, Southern Sulu, East Central China. *Lithos*, 81: 189—207. doi: 10.1016/j.lithos.2004.10.002
- Zhang, Z. M., Zhang, J. F., You, Z. D., et al., 2005. Ultrahigh-Pressure Metamorphic $P-T-t$ Path of the Sulu Orogenic Belt, Eastern-Central China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 257—270 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. F., Zhao, Z. F., Wu, Y. B., et al., 2006. Zircon U-Pb, Hf and O Isotope Constraints on Protolith Origin of Ultrahigh-Pressure Eclogite and Gneiss in the Dabie Orogen. *Chemical Geology*, 231: 135—158. doi: 10.1016/j.chemgeo.2006.01.005
- Zheng, Y. F., Wu, Y. B., Chen, F. K., et al., 2004. Zircon U-Pb and Oxygen Isotope Evidence for a Large-Scale ^{18}O Depletion Event in Igneous Rocks during the Neoproterozoic. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 68: 4145—4165. doi: 10.1016/j.gca.2004.01.007
- Zhou, K. F., 2004. Geochemical Characteristics and Genetic Mechanism of Gneiss in the Depth Interval 3 000—3 500 m from the Main Drill Hole of Chinese Continental Scientific Drilling Project (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 79—80 (in Chinese with English abstract).
- Zong, K. Q., Liu, Y. S., Hu, Z. C., et al., 2010. Melting-Induced Fluid during Exhumation of Gneisses of the Sulu Ultrahigh-Pressure Terrane. *Lithos*, 120: 490—510. doi: 10.3799/dqkx.2011.103
- ### 附中文参考文献
- 陈意,叶凯,吴春明,2005.榴辉岩常用温压计在应用中应注意的问题.岩石学报,21(4): 1067—1080.
- 韩宗珠,肖莹,于航,等,2007.南黄海千里岩岛榴辉岩的矿物化学及成因探讨.海洋湖沼通报,(1): 83—87.
- 侯泉林,武昱东,吴福元,等,2008.大别—苏鲁造山带在朝鲜半岛可能的构造表现.地质通报,27(10): 1659—1666.
- 纪壮义,赵环金,赵光华,1992.黄海海域千里岩岛发育榴辉岩.山东地质,8(2): 1.
- 李官保,刘保华,赵月霞,等,2011.南黄海千里岩附近海域第四纪构造活动特征.地球科学——中国地质大学学报,36(6): 977—984.
- 李敏,2011.南黄海千里岩隆起基底性质及动力学演化机制——来自榴辉岩的岩石学和地球化学证据(硕士学位论文).青岛:中国海洋大学.
- 李曙光,李秋立,侯振辉,等,2005.大别山超高压变质岩的冷却史及折返机制.岩石学报,21(4): 1117—1124.
- 廖晶,岳保静,施剑,2013.千里岩隆起在海区延伸问题探讨.海洋地质与第四纪地质,33(2): 153—162.
- 刘福来,薛怀民,2007.苏鲁—大别超高压岩石中高师SHRIMP U-Pb 定年研究—综述和最新进展.岩石学报,23(11): 2737—2756.
- 刘福来,薛怀民,许志琴,等,2006.大别超高压变质带的进变质、超高压和退变质时代的准确限定,以双河大理岩中榴辉岩锆石中 SHRIMP U-Pb 定年为例.岩石学报,22(7): 1761—1778.
- 任纪舜,姜春发,张正坤,等,1980.中国大地构造及其演化.北京:科学出版社,108—110.
- 石永红,林伟,王清晨,2008.大别山桐城地区雷庄低温高压榴辉岩的增温退变 $P-T$ 轨迹及其构造含义.岩石学报,24(8): 1759—1770.
- 石永红,王清晨,2006.大别山金河桥榴辉岩的精细 $P-T$ 轨迹与多阶段折返.岩石学报,22(12): 2850—2860.
- 石永红,王清晨,林伟,2006.大别山太湖地区榴辉岩岩石学、矿物成分和 $P-T$ 条件特征及其所揭示的构造含义.岩石学报,22(2): 414—432.
- 徐惠芬,杨天南,刘福来,等,2001.苏鲁高压—超高压变质带南部花岗片麻岩—花岗岩的多时代演化.地质学报,75(3): 371—378.
- 许志琴,刘福来,戚学祥,等,2006.南苏鲁超高压变质地体中罗地亚大陆裂解事件的记录.岩石学报,22(7): 1745—1760.

- 叶建国,2008.苏鲁仰口地区辉长岩深俯冲过程中的矿物相转变及变质演化 $P-T-t$ 轨迹(硕士学位论文).北京:中国地质科学院,42—64.
- 叶凯,丛柏林,平岛崇男,等,1999.山东海阳所麻粒岩向过渡榴辉岩转化的变质动力学过程及其构造意义.岩石学报,15(1): 21—36.
- 张贺,2013.南黄海前陆盆地动力过程与盆山耦合关系研究(硕士学位论文).青岛:中国海洋大学,5—48.

* * * * *

(上接1288页)

- 潘桂棠,莫宣学,侯增谦,等,2006.冈底斯造山带的时空结构及演化.岩石学报,22(3): 521—533.
- 曲晓明,侯增谦,辛洪波,2006.西藏冈底斯碰撞造山带两套埃达克岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地球化学特征.矿床地质,25(增刊): 419—422.
- 芮宗瑶,侯增谦,曲晓明,等,2003.冈底斯斑岩铜矿成矿时代及青藏高原隆升.矿床地质,22(3): 217—225.
- 王立全,潘桂棠,朱弟成,等,2008.西藏冈底斯带石炭纪一二叠纪岛弧造山作用:火山岩和地球化学证据.地质通报,27(9): 1509—1534.
- 吴元保,郑永飞,2004.锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约.科学通报,49(16): 1589—1602.
- 张宏飞,徐旺春,郭建秋,等,2007.冈底斯印支期造山事件:花岗岩类锆石 U-Pb 年代学和岩石成因证据.地球科学——中国地质大学学报,32(2): 156—166.
- 张旗,潘国强,李承东,等,2007.花岗岩构造环境问题:关于花岗岩研究的思考之三.岩石学报,23(11): 2683—2698.

- 张希道,王式洮,刘建文,等,1999.鲁东岚山头榴辉岩的变质作用演化 $P-T-t$ 轨迹及地质意义.岩石学报,15(1): 37—47.
- 张泽明,张金凤,游振东,等,2005.苏鲁造山带超高压变质作用及其 $P-T-t$ 轨迹.岩石学报,21(2): 257—270.
- 周开富,2004.中国大陆科学钻探工程主孔 3 000~3 500 m 片麻岩的地球化学性质及其成因机制(博士学位论文).北京:中国地质科学院,79—80.

- 赵志丹,莫宣学,董国臣,等,2007.青藏高原 Pb 同位素地球化学及其意义.现代地质,21(2): 265—274.
- 赵志丹,莫宣学,罗照华,等,2003.印度—亚洲俯冲带结构——岩浆作用证据.地学前缘,10(3): 149—157.
- 赵志丹,莫宣学, Nomade, S., 等, 2006. 青藏高原拉萨地块碰撞后超钾质岩石的时空分布及其意义. 岩石学报, 22(4): 787—794.
- 郑来林,耿全如,董翰,等,2003.波密地区帕隆藏布残留蛇绿混杂岩带的发现及其意义.沉积与特提斯地质,23(1): 27—30.
- 朱弟成,莫宣学,王立全,等,2009a.西藏冈底斯东部察隅高分异 I 型花岗岩成因:锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素约束.中国科学(D辑),39(7): 833—848.
- 朱弟成,莫宣学,赵志丹,等,2009b.西藏南部二叠纪和早白垩世构造岩浆作用与特提斯演化:新观点.地学前缘,16(2): 1—20.