

# Investigation of Northeast Extension and Geological Evolution of the Sulu-Dabie High-Pressure Metamorphic Belt

Qihang Yin, Pengfei Ma\*, Xuping Li

College of Geological Science & Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong  
Email: \*18554605319@163.com

Received: Jun. 4<sup>th</sup>, 2016; accepted: Jun. 25<sup>th</sup>, 2016; published: Jun. 28<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

The Qianliyan Island locates at the northern Yellow Ocean about 80 km east from Qingdao, which develops lenses and layers of eclogite. The Qianliyan Island has been considered as the marine extension of the Dabie-Sulu orogen by comparing these two geological settings, especially their eclogites characteristics, such as mineral assemblages and compositions, temperature and pressure conditions, P-T path and geochronology. Based on textures and mineral compositions, three metamorphic stages were distinguished. The first stage is symbolized by the peak metamorphic assemblage of Grt-Omp-Ph-Rt in eclogite,  $T = 775^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 2.6 \text{ GPa}$ . The second stage is represented by the retrograde assemblage amphibole + albite which form the symplectites around omphacite in eclogite,  $T = 740^{\circ}\text{C}\sim 790^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 1.60\sim 1.75 \text{ GPa}$ . The third stage is symbolized by the actinolite appearing as a symbol of greenschist facies. The metamorphic age of the Qianliyan eclogite is documented at the age of the late Triassic  $\sim 222 \text{ Ma}$ , consistent with those from Dabie-Sulu eclogites. It is proposed that the Qianliyan Island not only is the marine extension of the Dabie-Sulu orogen, but also may be the connecting part between Hongsong, South Korea, and the Dabie-Sulu orogen of China.

## Keywords

Qianliyan Island, Eclogite, P-T Condition, P-T Path, Metamorphic Age

---

\*通讯作者。

# 苏鲁 - 大别高压变质带东北向延伸及地质演化探讨

尹启航, 马鹏飞\*, 李旭平

山东科技大学地质科学与工程学院, 山东 青岛

Email: \*18554605319@163.com

收稿日期: 2016年6月4日; 录用日期: 2016年6月25日; 发布日期: 2016年6月28日

## 摘要

位于中国黄海北部青岛以东约80 km的千里岩岛发育有透镜状和层状榴辉岩。通过千里岩岛与中国苏鲁大别造山带两地榴辉岩在矿物特征、形成年代、变质峰值温压条件等地质环境方面的对比, 表明千里岩岛是苏鲁大别造山带海上的延伸。根据岩相学和矿物学研究千里岩岛榴辉岩主要经历了三个变质阶段: 以榴辉岩中Grt-Omp-Ph-Rt矿物组合为标志的第一变质阶段,  $T = 775^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 2.6 \text{ GPa}$ ; 以取代绿辉石的Amp + Ab后成合晶结构为标志的第二变质阶段,  $T = 740^{\circ}\text{C} \sim 790^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 1.60 \sim 1.75 \text{ GPa}$ ; 以出现阳起石, 进入绿片岩相阶段为标志的第三变质阶段。千里岩岛榴辉岩的变质年代约为222 Ma的晚三叠世, 与苏鲁 - 大别造山带榴辉岩变质年代一致。推测千里岩岛是苏鲁大别造山带东向海上的延伸, 并且是韩国洪城与中国苏鲁大别造山带之间的连接部分。

## 关键词

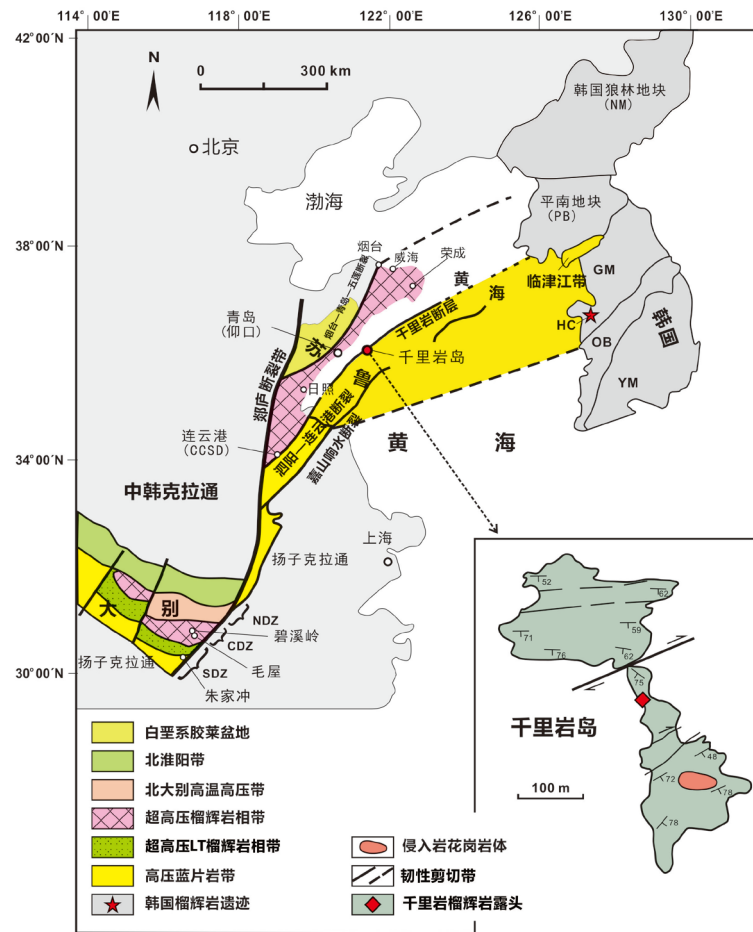
千里岩岛, 榴辉岩, 温压条件, P-T轨迹, 地质年代

## 1. 前言

大别 - 苏鲁造山带位于华北板块与扬子板块之间, 属秦岭造山带的东延部分, 大致呈东西向延长, 在华中地区分布宽广, 是三叠纪时南方扬子板块俯冲到华北板块的产物, 具有碰撞造山性质和两个阶段退变质作用[1]。根据地质产状和围岩组合, 大别苏鲁造山带可区分3种类型的榴辉岩[2]: 1) 主要被包裹在花岗质正片麻岩中; 2) 与大理岩互层或被包裹其中; 3) 与超镁铁岩共生。张泽明[3]将该带的榴辉岩分为形成温度  $< 550^{\circ}\text{C}$  的高压榴辉岩, 以石榴石中含前榴辉岩相的矿物包体和具典型的进变质作用成分环带为特征, 形成压力  $> 2.8 \sim 3.3 \text{ GPa}$  的超高压榴辉岩, 以含柯石英为特征。

纪壮义在1992年的山东地质学调查报告中首次提到千里岩岛榴辉岩。韩宗珠认为千里岩岛榴辉岩的原岩为华南陆块与华北陆块间的古岛弧拉斑玄武岩[4]。根据 Han *et al.* 的调查[4], 千里岩岛的主体构造是一条切割千里岩岛屿的西南西 - 北东北的剪切带, 地质调查表明是一个构造基岩岛[5] (与构造相关的岛屿), 榴辉岩的露头位于岛的中部, 靠近主剪切带(图 1)。该岛在构造上属于千里岩隆起, 是胶东地区的东南向延伸隆起[4]-[49]。野外研究工作表明, 薄层榴辉岩岩层及各种类型的片麻岩岩层发生变形具有局部褶皱(图 2)。通过对新鲜榴辉岩样品矿物学与岩石学研究, 确定千里岩岛发育有高压变质岩, 其形成时的温压条件与相邻的苏鲁 - 大别造山带和韩国造山带中高压变质岩形成时的温压条件接近。

千里岩岛地质简图在图 1 和图 2 中给出, 矿物缩写根据 Whitney & Evans (2010) [7]。



此次研究所采用的榴辉岩来自图中千里岩岛[4][8]。虚线连接的是苏鲁 - 大别至韩国[9]；NM - 狼林地块；PB - 平南盆地；GM - 京畿地块；HC - 洪城杂岩；OB - 沃川带；YM - 岭南地块[10][11]。千里岩岛在 2007 年修改了部分插图

**Figure 1.** Schematic geological map of Korean Peninsula and Yellow Sea, East China  
**图 1.** 朝鲜半岛及中国东部黄海地质概要图



千里岩岛取样的榴辉岩的地理位置用五角星标出。

**Figure 2.** The sampling locality of the Qianliyan Island  
**图 2.** 千里岩岛取样地理位置图。榴辉岩的地理位置用五角星标出

## 2. 地质背景概述

千里岩岛位于中国东部黄海中部西岸的大陆架上。北纬 36°15'56" 东经 121°23'10"，岛形似哑铃状，南北长约 0.82 km，东西宽约 0.24 km，占地面积约为 0.2 km<sup>2</sup>，最高点海拔 93.5 米。千里岩岛属于苏鲁超高压变质带的北带[12]，因受郯庐断裂带(图 1)南北走向的影响而呈 NEE 走向[13]，北界为烟台 - 青岛 - 五莲断裂，南界为嘉山 - 响水断裂(图 1)。千里岩岛由前寒武纪变质岩系组成，其基底主要为早元古界地层，是一套强烈韧性变形的片麻岩[14]。岛内发育断层，横切千里岩岛隆起，与泗阳 - 连云港断层相连。

大别岩层在构造上可划分为北大别山地带(NDZ)、中大别山地带(CDZ)和南大别山地带(SDZ)。北大别山地带发育以榴辉岩为代表的高压/超高压变质岩，中大别山地带发育超高压变质岩，南大别山地带又可再分为北部含柯石英超高压岩区和南部高压蓝片岩区(或称为宿松单元)[15]-[20](图 1)。苏鲁地块划分为北西方向的超高压带(与大别中心岩区相似)和南东方向的高压带(与大别南部高压蓝片岩区相似)；这两岩区被泗阳 - 连云港断裂(图 1)所分隔。

## 3. 榴辉岩岩相学

苏鲁 - 大别地区榴辉岩多呈透镜状、团块状、条带状或似层状产出[5]，与周围的花岗片麻岩一起发生了强烈的塑性变形。据张泽明统计，产自大别、东海和胶南变质杂岩中的榴辉岩大多具有相同的围岩和矿物组合特征，并多含有柯石英或金刚石[5]。在研究区内，榴辉岩呈较小的扁豆体或透镜状产出，并与花岗质片麻岩整合接触，围岩片麻理产状 150°∠60° [21]。核部榴辉岩相对新鲜，发生中等程度的角闪石化和绿泥石化，榴辉岩边缘退变质强烈。榴辉岩中主要和次要矿物依次为石榴石(40%~45%)、绿辉石(35%~40%)、多硅白云母(~10%)、绿帘石(~5%)、角闪石(<5%)和钠长石(<5%)；副矿物有磷灰石、金红石、榍石、方解石，这与李敏测定结果基本一致[22]。

## 4. 矿物学特征

矿物分析测试在德国 Stuttgart 大学完成，仪器型号 CAMECA SX100，工作条件：加速电压 15 kV，电子束流 20 nA。分析结果列于表 1~4 中。

### 4.1. 石榴石

石榴石以铁铝榴石(Alm)为主，石榴石核部较平坦，说明成分相对均一，其化学分子式为  $\text{Grs}_{15.51-19.99}\text{Alm}_{50.03-52.45}\text{Prp}_{19.58-23.49}\text{Sp}_{0.2-2.22}$ ；幔部成分： $\text{Grs}_{18.44-26.81}\text{Alm}_{46.69-58.47}\text{Prp}_{14.13-22.89}\text{Sp}_{0.2-2.23}$ 。

石榴石和单斜辉石作为榴辉岩的主要造岩矿物，其成分特征记录了岩石的形成及演化的丰富信息，对榴辉岩的成岩成矿具有重要的指示意义[23]，张泽明等人研究表明榴辉岩中石榴石化学成分与其全岩中的石榴石成分具有明显的正相关性[24]。镜下观察表明，石榴石颗粒边缘发育有钠角闪石冠状体，有的为绿帘石或黑云母反应边(图 3(a))，细粒(<0.5 mm)，且有明显变形，成分上表现为富铁铝榴石和贫锰铝榴石( $\text{Prp}_{14.14-22.90}\text{Alm}_{50.73-58.66}\text{Grs}_{15.57-23.40}\text{Sp}_{0.75-1.53}\text{Adr}_{3.72-8.63}$ ；表 1)。所有测试的石榴石 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量均小于 0.04%。同时，石榴石显示出少量的钛榴石组分(<0.6；表 1)，基于这些成分，得出千里岩岛榴辉岩属于 Coleman *et al.* (1965) 的 C 型榴辉岩，与张泽明等学者的研究结论一致[5]。

### 4.2. 单斜辉石

榴辉岩中单斜辉石主要为绿辉石和透辉石(表 2)。新鲜榴辉岩样品中绿辉石的总体含量相对稳定(43~46.2 mol%)，其硬玉组分 33%~37%，并含有 0.06 wt.% 的 TiO<sub>2</sub> 和 0.07 wt.% 的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，而边缘退变为细粒的钠角闪石 + 钠长石合晶。

**Table 1.** Electron microprobe analyses of garnet from the eclogite, Qianliyan Island  
**表 1.** 千里岩岛榴辉岩中石榴石电子探针分析

	Grt-1	Grt-2	Grt-3	Grt-4	Grt-5	Grt-6	Grt-7	Grt-8	Grt-9	Grt-10	Grt-11	Grt-12
SiO <sub>2</sub>	37.83	38.51	37.91	37.83	38.38	38.47	38.64	38.13	38.45	38.43	37.77	38.55
TiO <sub>2</sub>	0.16	0.19	0.03	0.04	0.18	0.03	0.03	0.02	0.04	0.08	0.38	0.03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.39	21.28	21.75	21.71	21.22	21.90	22.12	21.69	21.59	21.93	21.41	21.78
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	0.04	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	28.38	26.46	26.58	26.70	26.54	25.28	25.49	25.63	25.13	25.61	28.43	25.45
MnO	0.56	0.37	0.52	0.54	0.38	0.37	0.40	0.48	0.34	0.34	0.69	0.41
MgO	4.45	5.92	4.65	4.54	5.85	5.62	5.65	4.46	5.19	5.35	3.61	5.47
CaO	8.72	8.60	9.59	9.59	8.65	9.34	9.58	10.36	10.08	9.58	9.19	9.66
Na <sub>2</sub> O	0.02	0.02	0.04	0.04	0.02	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02	0.00	0.00
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
Total	101.54	101.40	101.07	100.98	101.25	101.05	101.92	100.78	100.84	101.38	101.48	101.35
Si	2.96	3.00	2.89	2.88	2.99	2.94	2.96	2.97	2.94	2.93	2.96	3.00
TAl	0.04	0.00	0.11	0.12	0.01	0.06	0.04	0.03	0.06	0.07	0.04	0.00
Al <sup>VI</sup>	1.89	1.90	1.85	1.85	1.89	1.94	1.92	2.00	1.91	1.92	1.92	1.99
Fe <sup>3+</sup>	0.14	0.10	0.25	0.27	0.12	0.11	0.11	0.03	0.14	0.15	0.12	0.00
Fe <sup>2+</sup>	1.69	1.58	1.45	1.45	1.57	1.51	1.47	1.67	1.49	1.50	1.73	1.61
Mg	0.47	0.69	0.58	0.57	0.68	0.69	0.68	0.47	0.60	0.62	0.42	0.57
Mn	0.07	0.00	0.06	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.05	0.00
Ca	0.75	0.74	0.81	0.81	0.74	0.75	0.81	0.84	0.84	0.79	0.77	0.82
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Alm	56.79	52.43	50.03	50.06	52.45	51.19	49.69	56.20	50.48	51.19	58.47	53.51
Grs	18.44	19.84	16.15	15.51	19.14	19.99	21.87	26.81	21.57	19.74	20.08	27.42
Prp	15.66	22.89	19.91	19.58	22.67	23.49	22.89	15.66	20.33	20.97	14.13	19.08
Sps	2.23	0.00	2.00	2.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.76	0.76	1.54	0.00

### 4.3. 云母

榴辉岩中的白云母有多硅白云母和钠云母两种,其中以多硅白云母居多,多硅白云母呈长条状分布,核部 Si (3.46)含量较高,狭窄且不规则的边缘带 Si (3.26)含量较低,整体 Si 含量范围为 3.26~3.46 (表 3)。张泽明等提出多硅白云母硅原子数在高压榴辉岩中为 3.34~3.43,在超高压榴辉岩中为 3.45~3.54 [25],与之对比推断研究区榴辉岩经历近超高压变质。

### 4.4. 角闪石

角闪石是千里岩岛榴辉岩中主要的退变质矿物,以细小的斑状变晶存在于石榴石和绿辉石颗粒间的空隙(图 3(d)),多与钠长石一起形成后成合晶。根据 Leake *et al.* (1997)的分类,大多数的角闪石含钙或者含钠含钙,含量从浅闪石/含铁非角闪石到阳起石各不相同。角闪石斑状变晶中主要为铁非闪石(表 4),后

**Table 2.** Electron microprobe analyses of omphacite and albite from the eclogite, Qianliyan Island  
**表 2.** 千里岩岛榴辉岩中绿辉石和钠长石电子探针分析

	Omphacite									Albite		
	Omp-7	Omp-8	Omp-30	Omp-11	Omp-12	Omp-39	Omp-48	Omp-8-incl <sup>*</sup>	Omp-40-incl	Ab-1	Ab-2	Ab-7
SiO <sub>2</sub>	54.18	55.64	54.55	54.76	54.60	54.75	55.18	54.49	54.74	68.15	66.83	66.80
TiO <sub>2</sub>	0.06	0.04	0.05	0.06	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.00	0.00	0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.14	9.54	8.98	9.17	9.11	9.64	9.20	9.06	9.18	19.82	20.32	19.83
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02	0.03	0.01	0.00	0.10
FeO	6.71	6.02	6.49	6.76	6.61	6.02	6.41	6.47	6.70	0.20	0.19	0.50
MnO	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO	8.33	8.66	8.46	8.36	8.29	8.26	8.33	8.31	8.12	0.01	0.02	0.29
CaO	13.30	13.80	13.62	13.38	13.30	13.21	13.34	12.94	13.21	0.70	1.21	1.58
Na <sub>2</sub> O	6.71	6.44	6.61	6.81	6.91	6.69	6.78	7.01	6.85	11.60	10.97	10.02
K <sub>2</sub> O	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.09	0.11	0.08
total	98.46	100.23	98.8	99.34	98.89	98.68	99.33	98.36	98.88	100.58	99.65	99.21
Si	1.97	1.98	1.97	1.97	1.97	1.98	1.98	1.97	1.98	2.97	2.94	2.95
Al	0.04	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	1.02	1.05	1.03
Fe <sup>3+</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02
Ca	50.56	48.12	50.39	50.43	50.69	49.04	49.35	51.17	50.11	0.03	0.06	0.07
Mg	44.06	42.01	43.55	43.84	45.30	42.67	42.87	44.38	42.86			
FS	17.38	15.51	16.63	17.44	17.09	16.03	16.76	17.20	17.59			
WEF	52.00	55.17	53.05	51.84	50.15	52.66	52.42	50.96	51.53			
JD	33.85	37.66	34.16	34.23	34.74	37.97	36.56	34.18	35.76			
AE	14.16	7.17	12.80	13.93	15.11	9.37	11.02	14.86	12.71			
Na										0.98	0.94	0.86

omp-8-incl<sup>\*</sup>代表石榴石中的包体。

成合晶中的角闪石为铁韭闪石, 韭闪石, 浅闪石, 它们与斑状变晶的角闪石相比, Si 和 Mg 的含量稍高, Al 和 Fe 的含量稍低。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。

#### 4.5. 绿帘石(Ep)

绿帘石形成于超高压和进退变质的各阶段, 且各个阶段形成的绿帘石成分较接近, 但榴辉岩相阶段却仅有少量的绿帘石形成。样品中绿帘石, 有时和方解石伴生, 出现在石榴石横切面的细小纹理中, 并沿石榴石和绿辉石的边界延伸分布, 表现出退变质成因。

#### 4.6. 金红石(Rt)

金红石是榴辉岩中常见副矿物, 样品中金红石以两种形式存在: 一种是以包体形式产于石榴石和绿辉石中(图 3(d)); 第二种是呈蚀变残留状, 并具有榴石退变边, 表明金红石在抬升的过程中发生退变质反应[26] [27]。

**Table 3.** Electron microprobe analyses of phengite from the eclogite, Qianliyan Island  
**表 3.** 千里岩岛榴辉岩多硅白云母电子探针分析

	Phen-3	Phen-4	omp-18	Phen-25	Phen-26	Phen-27	Phen-28	Phen-32	Phen-36	Phen-37	Phen-41	Phen-42
SiO <sub>2</sub>	51.22	51.12	50.99	50.92	51.17	51.11	51.10	50.13	50.18	50.87	51.35	50.97
TiO <sub>2</sub>	0.46	0.48	0.44	0.44	0.49	0.54	0.47	0.16	0.52	0.47	0.48	0.51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26.58	26.22	25.11	24.85	24.20	24.76	25.19	29.65	26.31	24.73	24.62	24.93
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00
FeO	3.87	3.83	3.70	3.94	3.50	3.53	3.71	3.61	3.89	3.73	3.94	3.76
MnO	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
MgO	3.52	3.54	3.65	3.71	4.30	4.04	3.90	2.30	3.70	4.04	3.85	3.82
CaO	0.10	0.06	0.03	0.03	0.00	0.01	0.06	0.04	0.05	0.02	0.05	0.01
Na <sub>2</sub> O	0.32	0.24	0.22	0.33	0.09	0.09	0.21	0.61	0.37	0.11	0.17	0.19
K <sub>2</sub> O	10.98	11.25	10.99	11.03	11.55	11.73	11.34	10.10	10.63	11.39	10.74	11.20
Total	95.82	95.60	95.15	95.29	95.35	95.81	95.98	96.61	95.64	95.37	95.22	95.39
Si	3.39	3.40	3.44	3.44	3.46	3.44	3.43	3.31	3.37	3.44	3.46	3.44
Al <sup>IV</sup>	0.61	0.60	0.56	0.56	0.54	0.56	0.57	0.69	0.63	0.56	0.54	0.56
Al <sup>VI</sup>	1.47	1.46	1.44	1.42	1.39	1.41	1.42	1.62	1.46	1.41	1.42	1.42
Ti	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02	0.03
Fe <sup>3+</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe <sup>2+</sup>	0.21	0.21	0.21	0.22	0.20	0.20	0.21	0.20	0.22	0.21	0.22	0.21
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.35	0.35	0.37	0.37	0.43	0.41	0.39	0.23	0.37	0.41	0.39	0.39
Ca	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.04	0.03	0.03	0.04	0.01	0.01	0.03	0.08	0.05	0.01	0.02	0.03
K	0.93	0.96	0.95	0.95	1.00	1.01	0.97	0.85	0.91	0.98	0.93	0.97

## 5. 变质阶段划分

根据岩相学特征及矿物之间的结构关系，该类榴辉岩具有 3 期变质矿物组合。

### 5.1. 第一变质阶段

以 Grt-Omp-Ph-Rt 的峰期矿物组合代表首次记录的变质事件。对石榴石中绿辉石和多硅白云母包裹体与相邻的石榴石进行电子探针分析，分析矿物的成分，还原各矿物形成的温压环境。峰期温压条件的计算使用 Berman (1988) 的热力学内部一致数据，石榴石和单斜辉石的活度模型采用 Berman (1990)；多硅白云母的活度模型采用 Massonne & Szpurka (1997)，用 PTAX 软件计算出 KFMASH 体系中的 4 个纯变质反应方程(如图 4(b))，估算出第一阶段的峰期变质温压条件约为 775°C，2.6 GPa (图 4(a))。

### 5.2. 第二变质阶段

钠长石与角闪石的退变质矿物组合代表第二期变质阶段。使用石 Grt-Cpx 地质温度计[28]和 Jd-Ab-Qtz

**Table 4.** Electron microprobe analyses of amphiboles from the eclogite, Qianliyan Island  
**表 4.** 千里岩岛榴辉岩中角闪石电子探针分析

	Amp-3	Amp-5	Amp-6	Amp-7	Amp-14	Amp-15	Amp-16	Amp-17	Amp-19	Amp-22	Amp-25	Amp-26
SiO <sub>2</sub>	39.47	40.34	41.14	52.66	49.36	52.04	50.98	41.74	38.84	52.52	51.08	50.63
TiO <sub>2</sub>	0.35	0.26	0.17	0.10	0.17	0.13	0.15	0.38	0.09	0.06	0.09	0.10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.10	14.07	14.39	3.24	6.90	4.61	4.63	14.12	18.65	3.07	3.42	3.23
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02	0.02	0.00	0.02	0.03	0.04
FeO	20.46	21.05	19.87	11.28	11.86	10.85	10.86	16.09	20.07	13.44	14.50	15.08
MnO	0.11	0.10	0.10	0.09	0.08	0.11	0.02	0.05	0.09	0.23	0.16	0.23
MgO	6.17	6.59	7.30	16.36	14.38	16.10	15.28	9.84	5.02	14.88	13.63	13.25
CaO	9.01	8.70	10.16	12.68	11.87	12.31	13.60	11.12	9.47	12.37	12.55	12.90
Na <sub>2</sub> O	3.82	3.75	2.94	0.77	1.60	0.87	1.08	2.50	3.34	0.49	0.49	0.50
K <sub>2</sub> O	0.88	0.77	0.65	0.12	0.38	0.22	0.25	1.33	0.98	0.12	0.16	0.15
Total	96.39	95.65	96.73	97.31	96.63	97.26	96.87	97.19	96.55	97.2	96.11	96.11
Si	6.18	6.27	6.37	7.69	7.25	7.47	7.45	6.34	6.04	7.71	7.52	7.65
Al	1.83	1.74	1.63	0.31	0.75	0.53	0.56	1.66	1.96	0.29	0.48	0.36
Fe <sup>3+</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe <sup>2+</sup>	2.39	2.35	2.35	1.33	1.49	1.15	1.31	1.84	2.22	1.38	1.48	1.88
Ca	1.53	1.51	1.67	2.02	1.90	0.00	2.19	1.78	1.49	1.87	2.05	2.09
Na	1.23	1.22	0.90	0.28	0.57	0.28	0.28	0.88	0.90	0.00	0.00	0.29
K	0.20	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.20	0.00	0.00	0.00

地质压力计[29], 估算出第二阶段的峰值变质条件为 1.60~1.75 GPa 和 740°C~790°C。所得峰值温压条件低于毛北岩体超高压榴辉岩的峰期变质条件 800°C, 4.5 Gpa [30], 同时也低于张泽明等学者测定的柯石英榴辉岩的形成条件 820°C~1000°C, 2.8~3.1 Gpa [5], 表明榴辉岩样本未达到超高压变质阶段(图 4(a))。利用石榴石, 绿辉石边缘组分的最大和最小值(石榴石边缘成分: Prp<sub>17.50</sub>Alm<sub>56.59</sub>Grs<sub>15.57</sub>Sps<sub>1.25</sub>Adr<sub>8.63</sub> 和 Prp<sub>17.46</sub>Alm<sub>52.31</sub>Grs<sub>23.40</sub>Sps<sub>1.07</sub>Adr<sub>5.71</sub>; 绿辉石边缘成分: Jd<sub>44.62</sub>, Jd<sub>44.90</sub>)绘制出图 4(a)中的曲线。

### 5.3. 第三变质阶段

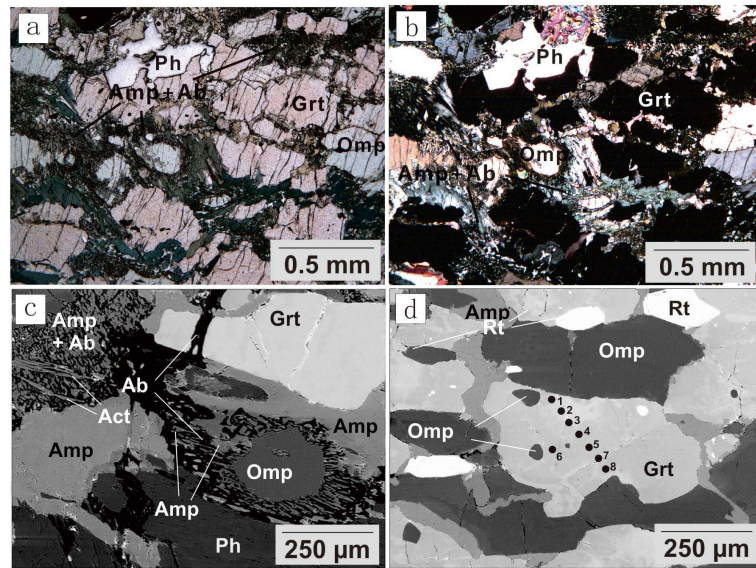
榴辉岩中阳起石和方解石的出现表明变质阶段进入到绿片岩相, 从而得到了一条顺时针 P-T 轨迹。

## 6. 苏鲁高压/超高压岩石与千里岩岛高压变质岩形成的温压条件比较

苏鲁造山带与千里岩岛地理位置相近, 根据榴辉岩和围岩花岗质片麻岩之间的紧密联系, 以及千里岩岛上的三种岩石类型(榴辉岩、二云绿帘斜长片麻岩、花岗质围岩片麻岩)都含有多硅白云母, 表明苏鲁高压/超高压变质带与千里岩岛变质带发生的是同一个时代的原地高压事件[39]。此外, 李敏通过对千里岩岛榴辉岩主量元素与微量元素特征值的分析, 得出千里岩岛榴辉岩兼具岛弧玄武岩和洋中脊玄武岩的性质, 形成的构造环境为弧后盆地[22]。

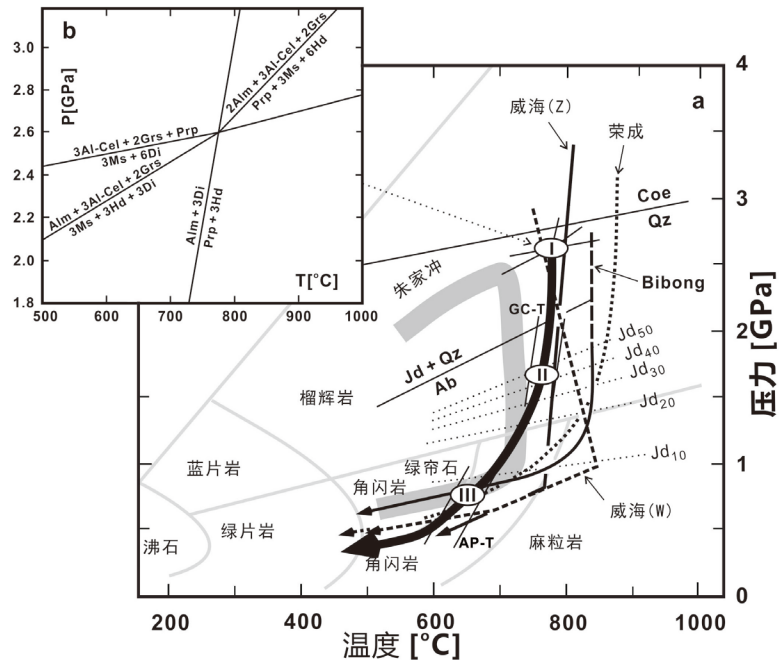
就变质温压条件方面分析, 山东半岛荣成地区陶航榴辉岩中发现含有柯石英(Yao *et al.*, 2000 [33]),





(a)为单偏光, (b)为正交偏光; (c), (d)为背散射电子图像。(a) 含有 Grt、Omp 和 Amp + Ab 后成合晶; (c) Grt 被 Ep 包围和 Omp 被 Amp + Ab 的后成合晶所包围; (d) Grt 中的 Omp 包裹体

**Figure 3.** Microphotograph of eclogite of Qianliyan Island  
**图 3.** 千里岩岛榴辉岩的显微照片



**Figure 4.** (a) Estimated P-T path of the Qianliyan HP metamorphic rocks. Thermobarometers used are: Grt-Cpx (GC-T; Ellis & Green [31]); Amp-Pl-Q (AP-T; Holland & Blundy [32]); compositional lines of Jd (Carswell & Harley [29]). Rongchen P-T path (Sulu) taken from Yao *et al.* [33]; Weihai (Z) (Sulu) from Zhang *et al.* [34]; Weihai (W) from Wang *et al.* [35]; Zhu-Jia-Chong (Dabie) from Castelli *et al.* [36]; Bibong (South Korea) from Oh *et al.* [37]. (b) Involved reactions for peak metamorphic stage I using PTAX method of Berman [38]

**图 4.** (a) 千里岩岛高压榴辉岩 P-T 轨迹。GC-T 代表石榴石-单斜辉石温度计(据 Ellis & Green [31]); AP-T 表示角闪石-斜长石-石英温度计(Holland & Blundy [32]); Jd 硬玉等压线(据 Carswell & Harley [29])。P-T 轨迹: 苏鲁荣成源于 Yao *et al.* [33]; 威海(Z) (苏鲁)源于 Zhang *et al.* (1995) [34]; 威海(W)根据 Wang *et al.* [35]; 朱家冲根据 Castelli *et al.* [36]; Bibong 根据 Oh *et al.* [37]。(b) 利用 Berman (1988) [38]数据和 PTAX 软件计算出的峰值变质条件

其最低峰值变质条件为 2.8 GPa 和 876°C。陶航榴辉岩温压曲线, 与千里岩岛温压曲线平行(图 4(a)), 但温度略高 100°C, 变质峰值位于柯石英的稳定域。Liu *et al.* (2006b) [40]对苏鲁地块南部不同岩性的高压蓝片岩锆石包裹体进行详细的研究, 虽发现有多种高压变质矿物, 但未在锆石包裹体中发现存在类似柯石英的超高压变质矿物, 测得温压为 500°C~600°C, 1.2~2.5 GPa, 表明苏鲁南部岩层未达到超高压变质条件。

笔者将南大别地区朱家冲榴辉岩及相邻的蓝晶石-黝帘石-石英脉的温压曲线(图 4)与千里岩岛榴辉岩做出对比。朱家冲榴辉岩的峰值变质条件约为 2.4 GPa 和 700°C, 稍低于千里岩岛榴辉岩。由于朱家冲榴辉岩内部含有大量的早期包体而不含柯石英及其假象, 石榴石自形或呈环礁状且环带结构明显的特征, 表明了该类榴辉岩俯冲深度较小, 在峰期变质阶段反应进行不彻底, 未达到柯石英相[49]。千里岩岛榴辉岩与朱家冲榴辉岩的变质条件、岩性特点相近, 推测千里岩岛榴辉岩形成时俯冲深度较小, 未达到超高压变质条件。

## 7. 地质年代研究

前人对苏鲁-大别峰期变质年代进行过详细的研究, 五庙柯石英榴辉岩的锆石 U-Pb 年龄为  $214.2 \pm 9.6$  Ma; 石马附近毛屋榴辉岩的锆石 U-Pb 年龄为  $225.5 \pm 3\sim 6$  Ma 和  $230 \pm 4$  Ma; 朱家冲榴辉岩锆石 SHRIMP 年龄为  $231.6 \pm 9.7$  Ma。Chavagnac & Jahn (1996) [41]和 Li *et al.* (1993 [42], 2000 [43])利用 Sm-Nd 同位素测得峰期变质年龄分别为  $221 \pm 5$  Ma 和  $225 \pm 7$  Ma; Cheng *et al.* (2008) [44]对大别超高压榴辉岩 Lu-Hf 和 Sm-Nd 进行研究, 并确定其超高压事件年代为 220~230 Ma。以上年代数据均表明苏鲁-大别榴辉岩形成于 220~230 Ma 的高压-超高压变质事件, 这与韩国 Bibong 变基性岩石 Sm-Nd 全岩年龄 225~258 Ma 接近[37]。

张贺等测得千里岩岛榴辉岩继承性锆石 SHRIMP U-Pb 加权平均年龄为  $(747 \pm 19)$  Ma [46], 说明榴辉岩的原岩经历过晋宁期热事件(约 800 Ma), 推测千里岩岛隆起区代表扬子板块的基底[13]。

## 8. 千里岩岛与韩国京畿地块关联性

朝鲜半岛自北向南依次为狼林地块、京畿道地块和岭南地块(图 1)三个主要的前寒武纪单元。平南盆地(PB)和临津江带(IB)位于狼林和京畿地块之间; 京畿地块和岭南地块被沃川带 OB 分隔[31] (图 1)。

朝鲜半岛西南部京畿地块发现有榴辉岩及其相关的高压变质岩石[10] [31] [37]。通过岩石学和地质年代学的研究分析, 认为韩国狼林地块、京畿地块和岭南地块的基底与中国华北板块基底有密切的成因联系[47]; 吴福元等[47]和侯泉林等学者[9]根据其相似的构造、变质过程和地史年代演化, 推断, 从朝鲜半岛北部的临津江带(IB)到南部的沃川带(OB)中生代造山运动与苏鲁-大别造山运动具有一致性。韩国的临津江带被认为是苏鲁造山带在朝鲜半岛的延伸[4] [8]。

韩国京畿地块西南部前寒武纪片麻岩中发育有洪城杂岩(图 1), Oh *et al.* [37]在洪城杂岩的石榴石中发现有绿辉石残留, 划分出三个变质阶段, 得到榴辉岩相阶段变质峰值条件为 17.0~20.9 kbar, 835°C~860°C。高压麻粒岩相温压条件为 11.5~14.6 kbar, 830°C~850°C, 角闪岩相阶段为 6.7~11 kbar, 570°C~740°C。其温压轨迹与千里岩岛榴辉岩相似, 但温度稍高 70°C~100°C, 与中国大陆科学钻探主孔获得榴辉岩 700°C~890°C [26]的峰值变质温度基本一致, 以上证据均表明韩国洪城经历过与苏鲁高压/超高压带相似的变质温压条件。此外, 千里岩岛榴辉岩峰期变质年龄与韩国 Bibong 变基性岩 Sm-Nd 全岩年龄[37]以及与退变质榴辉岩中变质锆石的 U-Pb 同位素 SHRIMP 年龄(Kim *et al.*, 2006) [10]相一致。以上证据均表明朝鲜半岛与苏鲁-大别造山带有密切的联系, 苏鲁-大别造山带可能延伸到朝鲜半岛。

## 9. 结论

根据岩石学、矿物学研究, 笔者识别出三期变质矿物组合, 第一期以 Grt-Omp-Ph-Rt 的峰期矿物组

合代表首次记录的变质事件, 估算出第一阶段的峰期变质温压条件约为 775°C, 2.6 GPa; 第二期以钠长石与角闪石的退变质矿物组合为代表, 估算出第二阶段的峰值变质条件为 1.60~1.75 GPa 和 740~790°C; 第三期以榴辉岩中阳起石和方解石的出现为代表, 表明进入到绿片岩相。通过苏鲁 - 大别造山带、千里岩岛和韩国洪城三地在岩石学、年代学、变质峰值温压条件等方面的对比, 得出苏鲁 - 大别高压/超高压变质带、千里岩岛变质带、韩国洪城高压杂岩变质带应该是同时代的原地高压变质事件。此外, 通过千里岩岛榴辉岩和朱家冲榴辉岩变质温压条件的比较, 千里岩岛榴辉岩与朱家冲榴辉岩的变质条件相近, 二者均未达到超高压变质阶段, 且千里岩岛原岩属于扬子板块。进一步得出苏鲁 - 大别造山带东北向通过千里岩岛一直与朝鲜半岛相连。为进一步得到千里岩岛与苏鲁 - 大别造山带和朝鲜半岛详细的连续性关系, 需对千里岩岛及其周边进行更详尽的地质填图。

## 致 谢

衷心感谢矿物化学成分分析得到 Thomas Theye 博士的帮助, 本项研究工作得到国家自然科学基金项目(41272072)的资助。

## 参考文献 (References)

- [1] 游振东, 索书田, 钟增球, 桑隆康, 张泽明. 大别山超高压变质岩的退变质显微构造:折返过程的启示[J]. 地质学报, 2000, 74(3): 224-265.
- [2] Cong, B.L. (1996) Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks in the Dabieshan-Sulu Region of China. Science Press, Beijing, 1-224.
- [3] 张泽明, 张金凤, 游振东. 苏鲁造山带超高压变质作用及其 P-T-t 轨迹[J]. 岩石学报, 2005, 21(2): 257-270.
- [4] 韩宗珠, 肖莹, 于航, 李三忠. 南黄海千里岩岛榴辉岩的矿物化学及成因探讨[J]. 海洋湖沼通报, 2007(1): 83-87.
- [5] 山东省科学技术委员会. 山东海岛研究[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1995: 43-320.
- [6] 金峰男, 杜劲松, 陈超. 中朝与扬子地块结合带东部的卫星重力异常特征研究[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(4): 1219-1232.
- [7] Witney, D.L. and Evans, B.W. (2010) Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals. *American Mineralogist*, **95**, 185-187. <http://dx.doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- [8] Yang, S.-N., Jiang, B.-H. and Wang, Z.-C. (1990) Tectonic Paleogeography Characteristics and Development of Collision Belt between the North China and Yangtze Cratons. China University of Geosciences Press, Wuhan.
- [9] 侯泉林, 武显东, 吴福元, 翟民国. 大别-苏鲁造山带在朝鲜半岛可能的构造表现[J]. 地质通报, 2008, 27(10): 1659-1666.
- [10] Kim, S.W., Oh, C.W., Williams, I.S., Rubatto, D., Ryu, I.-C., Rajesh, V.J., Kim, C.-B., Guo, J.H. and Zhai, M.G. (2006) Phanerozoic High-Pressure Eclogite and Intermediate-Pressure Granulite Facies Metamorphism in the Gyeonggi Massif, South Korea: Implications for the Eastward Extension of the Dabie-Sulu Continental Collision Zone. *Lithos*, **92**, 357-377. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2006.03.050>
- [11] Li, X.-P., Yang, J.-S., Robinson, P., Xu, Z.-Q. and Li, T.-F. (2011) UHP-Metamorphosed Mafic-Ultramafic Rocks from the Main Hole of the Chinese Continental Scientific Drilling Project (CCSD-MH), Sulu, China: Petrology, Geochemistry and Fluid/ Melt-Rock Interaction. *Journal of Asian Earth Sciences*, **42**, 661-683. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.01.010>
- [12] 马杏垣. 江苏响水值内蒙满都拉地学断面南北两段的地质观察[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1989(1): 1-7.
- [13] 李敏, 韩宗珠, 许红, 等. 南黄海千里岩岛榴辉岩的地球化学特征及成因分析[J]. 中国海洋大学学报, 2014, 44(11): 059-066.
- [14] 来志庆, 邹昊, 陈淳, 等. 南黄海千里岩隆起区构造属性及地质演化[J]. 海洋湖沼通报, 2011(4): 164-168.
- [15] Zheng, Y.-F., Fu, B., Gong, B. and Li, L. (2003) Stable Isotope Geochemistry of Ultrahigh Pressure Metamorphic Rocks from the Dabie-Sulu Orogen in China: Implications for Geodynamics and Fluid Regime. *Earth-Science Reviews*, **62**, 105-161. [http://dx.doi.org/10.1016/S0012-8252\(02\)00133-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00133-2)
- [16] Li, X.-P., Zheng, Y.-F., Wu, Y.-B., Chen, F., Gong, B. and Li, Y.-L. (2004) Low-T Eclogite in the Dabie Terrane of

- China: Petrological and Isotopic Constraints on Fluid Activity and Radiometric Dating. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **148**, 443-470. <http://dx.doi.org/10.1007/s00410-004-0616-9>
- [17] Li, X.-P., Li, Y.-L. and Shu, G.-M. (2005) Breakdown of Lawsonite Subsequent to Peak UHP Metamorphism in the Dabie Terrane and Its Implication for Fluid Activity. *Chinese Science Bulletin*, **50**, 1366-1372.
- [18] Liu, Y.-C., Li, S., Gu, X., Xu, S. and Chen, G. (2007) Ultrahigh-Pressure Eclogite Transformed from Mafic Granulite in the Dabie Orogen, East-Central China. *Journal of Metamorphic Geology*, **25**, 975-989. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1525-1314.2007.00739.x>
- [19] Liu, Y.-C., Gu, X., Rolfo, F. and Chen, Z. (2011) Ultrahigh-Pressure Metamorphism and Multistage Exhumation of Eclogite from the Luotian Dome, North Dabie Complex Zone (Central China): Evidence from Mineral Inclusions and Decompression Texture. *Journal of Asian Earth Sciences*, **42**, 607-617. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.10.016>
- [20] Liu, F.L. and Liou, J.G. (2011) Zircon as the Best Mineral for *P-T*-Time History of UHP Metamorphism: A Review on Mineral Inclusions and U-Pb SHRIMP Ages of Zircons from the Dabie-Sulu UHP Rocks. *Journal of Asian Earth Sciences*, **40**, 1-39. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.08.007>
- [21] 李敏. 南黄海千里岩榴辉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[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [22] 李敏, 韩宗珠, 秘丛永, 等. 苏鲁榴辉岩带的矿物地球化学研究及意义[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2015, 45(1): 063-070.
- [23] 邱检生, 王汝成, 蒋少涌, 等. 中国大陆科学钻探主孔榴辉岩中石榴石和绿辉石原位激光探针分析及其成岩成矿指示意义[J]. 岩石学报, 2007, 23(12): 3221-3230.
- [24] 张泽明, 沈昆, 等. 南苏鲁造山带毛北超高压变质岩体的成因与成矿作用[J]. 岩石学报, 2007, 23(12): 3095-3015.
- [25] 张泽明, 游振东, 韩郁蕾, 桑隆康. 大别-苏鲁榴辉岩带的岩石学、变质作用过程及成因研究[J]. 地质学报, 1995, 69(4): 306-325.
- [26] 余金杰, 徐珏, 陈振宇, 等. 中国大陆科学钻探工程主孔榴辉岩中金红石微量元素地球化学特征[J]. 地质学报, 2006, 80(12): 55-58.
- [27] Wang, R.C., Qiu, J.S., Wang, S., Hu, J. and Zhu, X. (2006) Titanium Mineralization in Sulu Ultrahigh-Pressure Eclogites: Mineralization at the Convergent Boundary between North China Plate and Yangtze Plate. *Acta Geologica Sinica*, **80**, 1827-1834.
- [28] Ellis, D.J. and Green, D.H. (1979) An Experimental Study of the Effect of Ca upon Garnet-Clinopyroxene Fe-Mg Exchange Equilibria. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **71**, 13-22. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00371878>
- [29] Carswell, D.A. and Harley, S.L. (1990) Mineral Barometry and Thermometry. In: Carswell, D.A. Ed., *Eclogite Facies Rocks*, Blackie, New York, 83-110.
- [30] 张泽明, 沈昆, 刘勇胜, 等. 南苏鲁造山带毛北超高压变质岩体的成因与成矿作用[J]. 岩石学报, 2007, 23(12): 3095-3115.
- [31] Oh, C.W. and Kusky, T.M. (2007) The Late Permian to Triassic Hongseong-Odesan Collision Belt in South Korea, and Its Tectonic Correlation with China and Japan. *International Geology Review*, **49**, 636-657. <http://dx.doi.org/10.2747/0020-6814.49.7.636>
- [32] Holland, T. and Blundy, J. (1994) Non-Ideal Interactions in Calcic Amphiboles and Their Bearing on Amphibole-Plagioclase Thermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **116**, 433-447. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00310910>
- [33] Yao, Y., Ye, K., Liu, J., Cong, B. and Wang, Q. (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. [http://dx.doi.org/10.1016/S0024-4937\(99\)00087-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0024-4937(99)00087-0)
- [34] Zhang, R.Y., Liou, J.G. and Ernst, W.G. (1995) Ultrahigh-Pressure Metamorphism and Decompressional P-T Paths of Eclogites and Country Rocks from Weihai, Eastern China. *Island Arc*, **4**, 293-309. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1440-1738.1995.tb00151.x>
- [35] Wang, Q., Ishiwatari, A., Zhao, Z.Y., Hirajima, T., Hiramatsu, N., Enamim, M., Zhai, M.G., Li, J.J. and Cong, B.L. (1993) Coesite-Bearing Granulite Retrograded from Eclogite in Weihai, Eastern China. *European Journal of Mineralogy*, **5**, 141-152. <http://dx.doi.org/10.1127/ejm/5/1/0141>
- [36] Castelli, D., Rolfo, F., Compagnoni, R. and Xu, S.T. (1998) Metamorphic Veins with Kyanite, Zoisite and Quartz in the Zhu-Jia-Chong Eclogites, Dabie Shan, China. *Island Arc*, **7**, 159-173. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1440-1738.1998.00185.x>
- [37] Oh, C.W., Kim, S.W., Choi, S.G., Zhai, M., Guo, J. and Sajeev, K. (2005) First Finding of Eclogite Facies Metamorphic Event in South Korea and Its Correlation with the Dabie-Sulu Collision Belt in China. *The Journal of Geology*,

113, 226-232. <http://dx.doi.org/10.1086/427671>

- [38] Berman, R.G. (1988) Internally-Consistent Thermodynamic Data for Minerals in the System  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ . *Journal of Petrology*, **29**, 455-522. <http://dx.doi.org/10.1093/petrology/29.2.445>
- [39] Li, X.-P., Yan, J.-Y., Schertl, H.-P., Kong, F.-M. and Xu, H. (2014) Eclogite from the Qianliyan Island in the Yellow Sea: A Missing Link between the Mainland of China and the Korean Peninsula. *European Journal of Mineralogy*, **26**, 727-741.
- [40] Liu, F.L., Liou, J.G. and Xue, H.M. (2006b) Identification of UHP and Non-UHP Orthogneisses in the Sulu UHP Terrane, Eastern China: Evidence from SHRIMP U-Pb Dating of Mineral Inclusion-Bearing Zircons. *International Geology Review*, **48**, 1067-1086. <http://dx.doi.org/10.2747/0020-6814.48.12.1067>
- [41] Chavagnac, V. and Jahn, B. (1996) Coesite-Bearing Eclogites from the Bixiling Complex, Dabie Mountains, China: Sm-Nd Ages, Geochemical Characteristics and Tectonic Implications. *Chemical Geology*, **133**, 29-51. [http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2541\(96\)00068-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2541(96)00068-X)
- [42] Li, S.-G., Xiao, Y.L., Liou, D.L., Chen, Y.Z., Ge, N.J., Zhang, Z.Q., Sun, S.S., Cong, B.L., Zhang, R.Y., Hart, S.R. and Wang, S.S. (1993) Collision of the North China and Yangtze Blocks and Formation of Coesite-Bearing Eclogites: Timing and Processes. *Chemical Geology*, **109**, 89-111. [http://dx.doi.org/10.1016/0009-2541\(93\)90063-O](http://dx.doi.org/10.1016/0009-2541(93)90063-O)
- [43] Li, S.-G., Jagoutz, E., Chen, Y.Z. and Li, Q.L. (2000) Sm-Nd and Rb-Sr Isotopic Chronology and Cooling History of Ultrahigh Pressure Metamorphic Rocks and Their Country Rocks at Shuanghe in the Dabie Terrain, Central China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **64**, 1077-1093. [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00319-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00319-1)
- [44] Cheng, H., King, R.L., Nakamura, E., Vervoort, J.D. and Zhou, Z. (2008) Coupled Lu-Hf and Sm-Nd Geochronology Constrains Garnet Growth in Ultra-High-Pressure Eclogites from the Dabie Orogen. *Journal of Metamorphic Geology*, **26**, 741-758. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1525-1314.2008.00785.x>
- [45] 韩宗珠, 刘涵, 许红, 等. 南黄海盆地盆山耦合作用与地质演化[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(4): 055-062.
- [46] 张贺. 南黄海前陆盆地动力过程与盆山耦合关系研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [47] Wu, F.Y., Zhao, G.C., Wilde, S.A. and Sun, D. (2005) Nd Isotopic Constraints on Crustal Formation in the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, **24**, 523-545. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2003.10.011>
- [48] Guo, J.H., Zhai, M., Oh, C.W. and Kim, S.W. (2004) 230 Ma Eclogite from Bibong, Hongseong Area, Gyeonggi Massif, South Korea: HP Metamorphism, Zircon SHRIMP U-Pb Ages, and Tectonic Implication. Abstract volume of Int. Ass. Gond. Res., South Korea Chapter, Miscellaneous Pbl., Chonju, 11-12.
- [49] Liao, J., Que, B. and Shi, J. (2013) Extension of Qianliyan Uplift in the South Yellow Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, **33**, 153-162. (Chinese with English Abstract) <http://dx.doi.org/10.3724/SP.J.1140.2013.02153>

#### 再次投稿您将享受以下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>