

苏鲁地体南部高压变质带岩石地球化学特征 及其地质意义

戚学祥¹, 许志琴¹, 齐金忠^{1,2}

(1. 中国地质科学院 地质研究所 大陆动力学实验室, 北京 100037; 2. 廊坊武警黄金研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要: 苏鲁地体南部的高压变质带由中温高压变质岩片和低温高压变质岩片两部分组成, 前一岩片自下而上依次为含砾白云石英岩、云母二长石英片岩、大理岩-磷块岩、白云钠长石英片岩; 后一岩片的主要岩石类型为二长石英片岩-钠长石英片岩。两岩片中片岩内的斜长石端员组成为钠长石, 长石斑晶具有明显的火山晶屑特征, 锆石具有岩浆成因韵律环带, 其 $Th/U > 0.5$ 。此外, 它们都具有高硅、高碱、低钙, 轻稀土元素富集、分馏程度高, 重稀土元素亏损、分馏程度低, Eu 强到中度亏损及 Nb 、 P 、 Ti 负异常的特征, 在 $SiO_2 - A \cdot R$ 图解上均位于碱性岩区, 在铝饱和指数图解中分布在偏铝质-过铝质区, 在 $(K_2O + Na_2O)/CaO - Zr + Nb + Ce + Y$ 图解上落在 A 型岩区。这些特征说明其原岩为火山岩, 其岩石类型为过铝质-偏铝质碱性流纹岩类, 其成因类型为 A 型。常量元素和微量元素组成特征及其判别图解反映其原岩形成于板内拉张环境, 是新元古代 Rodinia 大陆裂解、扬子地块陆内裂谷形成过程中伴生的产物。

关键词: 高压变质带; 变质火山岩; 地球化学; 陆内裂谷; 苏鲁

中图分类号: P588.3; P59

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2005)05-0476-09

Geochemical characteristics of metamorphic rocks in the HPM belt along the southern margin of Sulu terrane and their geological implications

QI Xue_xiang¹, XU Zhi_qin¹ and QI Jin_zhong^{1,2}

(1. Key Laboratory for Continental Dynamics, Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China;

2. Gold Geological Institute of China Armed Police Force, Langfang 065000, China)

Abstract: The HP metamorphic belt along the southern margin of Sulu terrane is made up of a middle temperature_high pressure metamorphic slice and a low temperature_high pressure metamorphic slice. The former slice consists of gravel_bearing phengite feldspar quartzite, mica feldspar quartz schist, marble_phosphate rock and phengite albite quartz schist in upward succession, whereas the latter consists of feldspar quartz schist and albite quartz schist. In schists, the end_member component of plagioclase is albite, the feldspar phenocrysts have features of volcanic crystal fragments, and the zircon has magmatic rhythm crystallization zoning and high Th/U ratio (> 0.5). In addition, the schists exhibit high SiO_2 and $Na_2O + K_2O$, low CaO , enrichment of LREE with strong fractionation, depletion of HREE with weak fractionation, δEu between 0.13 and 0.47, and significant negative Nb , P and Ti anomalies. The schists are plotted in the alkaline field in a SiO_2 versus $A \cdot R$ discrimination diagram, in the A_type field in a $(K_2O + Na_2O)/CaO$ versus $Zr + Nb + Ce + Y$ discrimination diagram. The schists in the medium temperature_high pressure metamorphic slice and in the low temperature_high pressure metamorphic slice are plotted in the peraluminous field and the metaluminous field respectively in a A/CNK versus A/NK discrimination diagram. It is thus considered that the protoliths of the three sorts of schists are acid volcanic rocks, and that the rock type and genetic type of the volcanic rocks are peraluminous to metaluminous alkaline rhyolite and A type igneous rocks, respectively. According to the major and trace element discrimination diagrams, the volcanic rocks were formed in an extensional plate environment and might have been an accessory product during the breakup of Rodinia continent and the formation of Yangtze intracontinental rift in Neoproterozoic.

Key words: high_pressure metamorphic (HPM) belt; metamorphic volcanic rock; geochemistry; intracontinental rift; Sulu

收稿日期: 2005-07-05; 修订日期: 2005-07-30

基金项目: 973 专项项目(2003CB7165004); 国家自然科学基金重大项目(40399140)

作者简介: 戚学祥(1963-), 男, 博士, 构造地质学专业, 主要从事变质变形构造等方面的研究。

苏鲁高压-超高压变质地体是扬子板块向华北板块下俯冲形成的大别-苏鲁高压-超高压变质带的重要组成部分 (Ames *et al.*, 1996; Hacker *et al.*, 1998)。中国大陆科学钻探工程 (CCSD) 就位于苏鲁高压-超高压变质地体南部——苏北连云港地区的东海县境内。近年来,对苏鲁高压-超高压变质带内的榴辉岩、超基性岩、花岗片麻岩等的变质作用、同位素年代学及构造地质学等方面的研究取得一系列进展,特别是 1/5 万^①、1/25 万^②地质填图工作的完成为该区构造格架的确立奠定了基础。许志琴等 (2003) 根据折返构造面理、变质岩石单元的分带特征及其与韧性剪切带的空间分布关系将苏鲁高压-超高压变质带自南东到北西依次划分出 4 个岩片,并以沐阳-锦屏韧性剪切带勾勒出北部超高压变质带与南部高压变质带的界限,确立了该区的构造格局 (图 1a)。已基本查明高压-超高压变质岩原岩及高压-超高压变质作用的形

成时代,认为超高压变质带原岩主要形成于 748~ 859 Ma (徐惠芬等, 2001; 刘福来等, 2003; 戚学祥等, 2005),超高压变质作用发生在 220~ 242 Ma (Liu *et al.*, 2003),中温高压变质岩片原岩形成于 814 Ma (戚学祥等, 2005),变质作用发生在 220 Ma (李锦轶等, 2004)。这些研究主要集中在苏鲁高压-超高压变质地体中的超高压变质带,而对高压变质带的研究相对薄弱,尤其是高压变质带的岩石学特征及其原岩形成环境等方面的研究力度有待于加强。为此,笔者通过对江苏连云港一带高压变质岩进行实地勘查,结合岩石薄片镜下鉴定、锆石阴极发光和地球化学测试结果等分析,重点对高压变质岩片内的云母二长石英片岩、白云钠长石英片岩和二(钠)长石英片岩进行了研究,认为苏鲁地区的高压变质带主要由数层形成于板内环境的火山岩及滨海环境的化学沉积岩夹层组成。

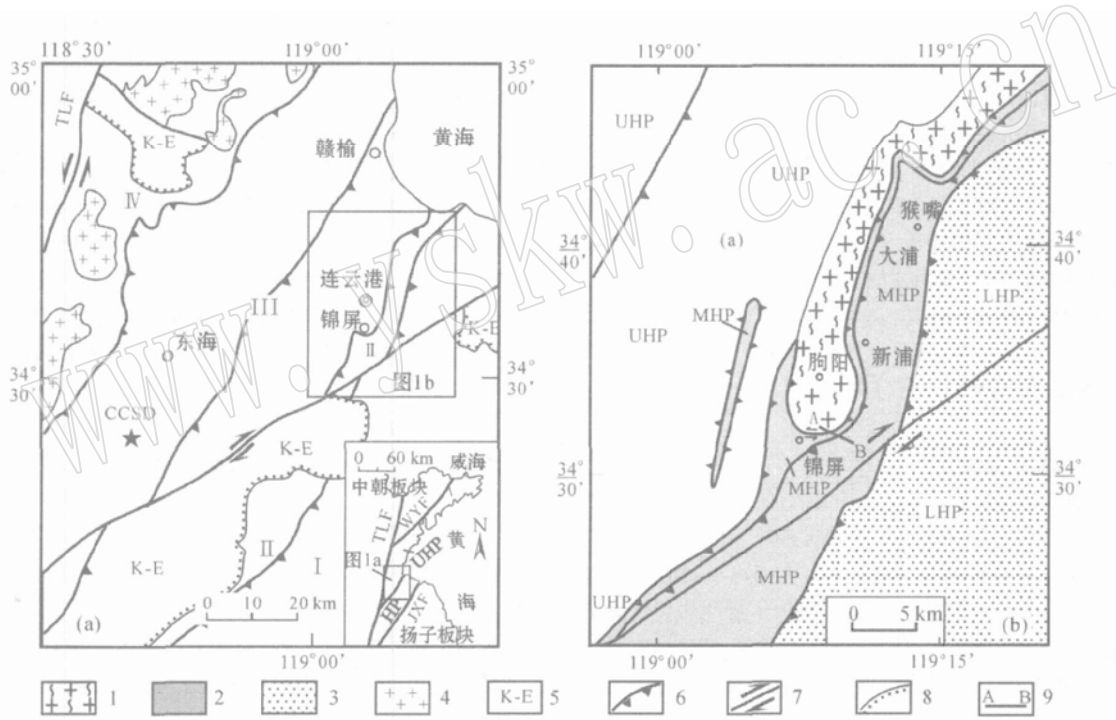


图 1 苏鲁地体南部高压变质带构造地质略图 [据许志琴等 (2003, 2005) 修编]

Fig. 1 Sketch tectonic geological map of the high pressure metamorphic belt in southern Sulu terrane (modified after Xu *et al.*, 2003, 2005)

- 1—胸山花岗片麻岩; 2—中温高压变质岩; 3—低温高压变质岩; 4—中生代花岗岩; 5—白垩纪-第三纪沉积物; 6—逆冲型韧性剪切带; 7—大型走滑断裂带; 8—不整合面; 9—剖面位置; I—南苏鲁低温高压岩片; II—南苏鲁中温高压岩片; III—北苏鲁超高压变质壳岩剪切构造叠覆岩片; IV—北苏鲁超高压花岗质变质岩剪切构造叠覆岩片; UHP—超高压变质岩片; MHP—中温高压变质岩片; LHP—低温高压变质岩片
 1—Qianshan orthogneiss; 2—middle temperature_high pressure metamorphic rocks; 3—low temperature_high pressure metamorphic rocks; 4—Mesozoic granites; 5—Cretaceous_Tertiary sedimentary rocks; 6—ductile thrust; 7—large strike_slip fault zone; 8—unconformity; 9—location of profile for Fig. 2; I—shear tectonic imbricate low temperature_high pressure slices in southern Sulu; II—shear tectonic imbricate middle temperature_high pressure slices in southern Sulu; III—shear tectonic imbricate slices of ultrahigh pressure metamorphic supercrust in northern Sulu; IV—shear tectonic imbricate slices of ultrahigh pressure granitic metamorphic rock in northern Sulu; UHP—ultrahigh pressure metamorphic slice; MHP—middle temperature_high pressure metamorphic slice; LHP—low temperature_high pressure metamorphic slice

① 江苏省地质矿产研究所, 1994. 1/50000 墩上幅、连云港镇幅、连云港市幅、东辛农场幅区域地质调查报告, 25~ 179.

② 许志琴, 张泽明, 潘明宝, 等. 2005. 1/250000 连云港市幅区域地质调查报告, 8~ 35.

1 地质背景

苏鲁高压变质带分布于苏鲁高压-超高压变质带南部, 北东向沭阳-锦屏逆冲型韧性剪切带构成其与西北部超高压变质带的边界(许志琴等, 2003), 东南部以嘉山-响水断裂为界(于津海等, 2001; 许志琴等, 2003), 总体走向北东-北北东, 在苏北的连云港-灌云-沭阳-韩山-猴嘴等地皆有出露。根据高压变质带内变质岩的形成温度将其分为低温高压变质岩片和中温高压变质岩片两部分, 其间以猴嘴-韩山逆冲型韧性剪切带为界(许志琴等, 2003)(图 1a), 其形成的温压条件分别为 300~360 °C, 0.7~0.85 GPa(邱海峻等, 2003; 齐金忠等, 2005) 和 500~600 °C, 1.0~2.5 GPa(Zhang *et al.*, 2002; Liu *et al.*, 2004), 远低于超高压变质岩片形成的温压条件(650~852 °C, $P > 2.8$ GPa(Zhang *et al.*, 2002; 2003; Liu *et al.*, 2004)。中温高压变质岩片沿苏北的沭阳-连云港-韩山一带分布, 构成一向北东延伸进入黄海的狭长带状体(图 1a b), 由变质沉积岩和火山岩组成(樊金涛, 1995; 周建波等, 2001), 特征性矿物有黄玉、蓝晶石、石榴石、多硅白云母(Zhang *et al.*, 2002)。低温高压变质岩片展布于猴嘴-韩山逆冲型韧性剪切带和嘉山-响水断裂带之间, 北东向延伸进入黄海(图 1a b), 主要由变质火山岩构成(樊金涛, 1995), 特征性矿物为石榴石、多硅白云母、文石、透蓝闪石等。

2 高压变质带岩石学特征

2.1 中温高压变质岩片

中温高压变质岩片自下而上依次为云母二长石英片岩、大理岩、磷块岩、含锰磷块岩、含磷大理岩、白云钠长石英片岩(图 2, 3a b) 夹绿帘钠长角闪片岩。在云母二长石英片岩下部发育宽 8~10 m 的含砾岩层, 并叠加了后期的韧性剪切变形改造。由大小不一(0.1~25 cm)、呈次圆-圆状砾石及基质组成, 基底式胶结, 杂基支撑结构, 砾石的主要成分为花岗片

麻岩(占砾石的 90%), 其次为石英岩(占砾石的 10%), 含砾岩层的基质为白云母长石石英岩。据此认为该套岩石及其上部的云母二长石英片岩是滨海相沉积碎屑岩(江苏省地质矿产调查研究所, 1994), 但镜下观察发现云母二长石英片岩具有变斑状、变余晶屑结构, 基质为粒状变晶结构, 主要成分为钠长石、微斜长石和石英, 其次为多硅白云母和黑云母及微量的磷灰石和磁铁矿等, 偶见蓝晶石、金红石、榍石、石榴石, 变质程度达高绿片岩相。钠长石和微斜长石斑晶外形不规则, 多呈棱角状、受熔浆溶蚀而形成港湾状、锯齿状, 偶见边界平整和次生加大现象, 展示出火山晶屑的特征(图 3a₁)。此外, 岩石中的锆石大部分呈短柱状, 个别呈长柱状, 粒度在 0.03~0.1 mm 之间, 长宽比 1.5:1, 个别可达 2:1, 晶形为半自形-他形, 晶面平整光滑, 锆石阴极发光图像显示其内部韵律生长环带发育, 而且所有锆石都不存在继承性残晶及新生环带, 其 Th/U 值在 0.97~1.90 之间(戚学祥等, 2005), 具有典型的岩浆成因性质(Hanchar and Miller, 1993; Claesson *et al.*, 2000; Hoskin and Schaltegger, 2003)。这些特征表明云母二长石英片岩原岩可能为火山岩类。

白云钠长石英片岩整合覆盖于磷块岩、含磷大理岩之上, 呈厚层状或似层状, 变形作用明显, 局部可见变余层理。岩石呈灰、青灰色, 块状构造, 变斑状、变余晶屑结构, 基质为鳞片粒状变晶结构。主要矿物组成为钠长石、石英、白云母, 其次为微斜长石。此外, 可见微量的绿帘石、黝帘石、方解石、石榴石、蓝晶石和黄玉(Zhang *et al.*, 2002)、磷灰石、磁铁矿和黄铁矿等, 偶见榍石、金红石, 变质程度达高绿片岩相。整个岩石虽然都经历了重结晶作用, 但钠长石斑晶仍保留了棱角状、长条状、不规则状火山晶屑特征(图 3b₁), 其岩石类型亦属火山岩类。

总体来看, 中温高压变质岩片原岩的形成经历了海底火山喷发沉积到浅海化学沉积再到火山喷发沉积的演变过程, 原岩建造为海底火山喷发沉积岩-浅海化学沉积的钙质白云岩类和生物沉积的磷块岩-海底火山喷发沉积岩(图 2)。本文将原岩为酸性火山岩相的两类片岩进行讨论。

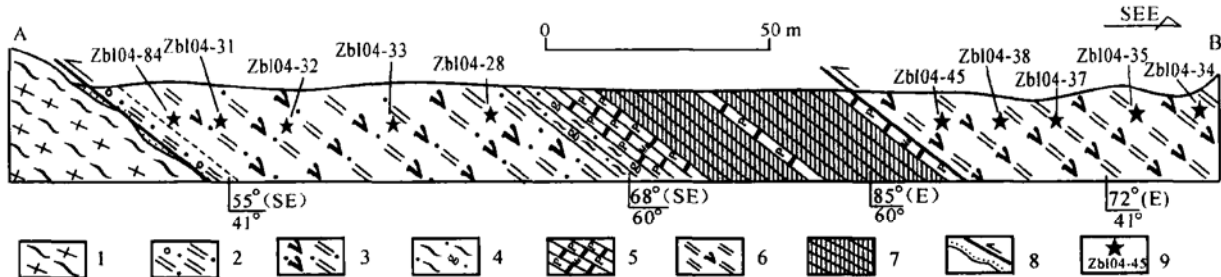


图 2 中温高压变质岩片地质剖面图

Fig. 2 Geological section of the middle temperature and high pressure slice

1—花岗片麻岩; 2—含磷白云母石英片岩; 3—云母二长石英片岩; 4—含金红石石榴石云母片岩; 5—含磷白云质大理岩;

6—白云钠长石英片岩; 7—磷块岩; 8—逆冲断层和不整合接触面; 9—采样位置及编号

1—granitic gneiss; 2—apatite-bearing phengite quartz schist; 3—mica feldspar quartz schist; 4—rutile garnet bearing mica schist;

5—apatite and rhodochrosite bearing dolomite marble; 6—phengite albite quartz schist; 7—phosphorite; 8—thrust and unconformity

contact; 9—sampling site and its serial number

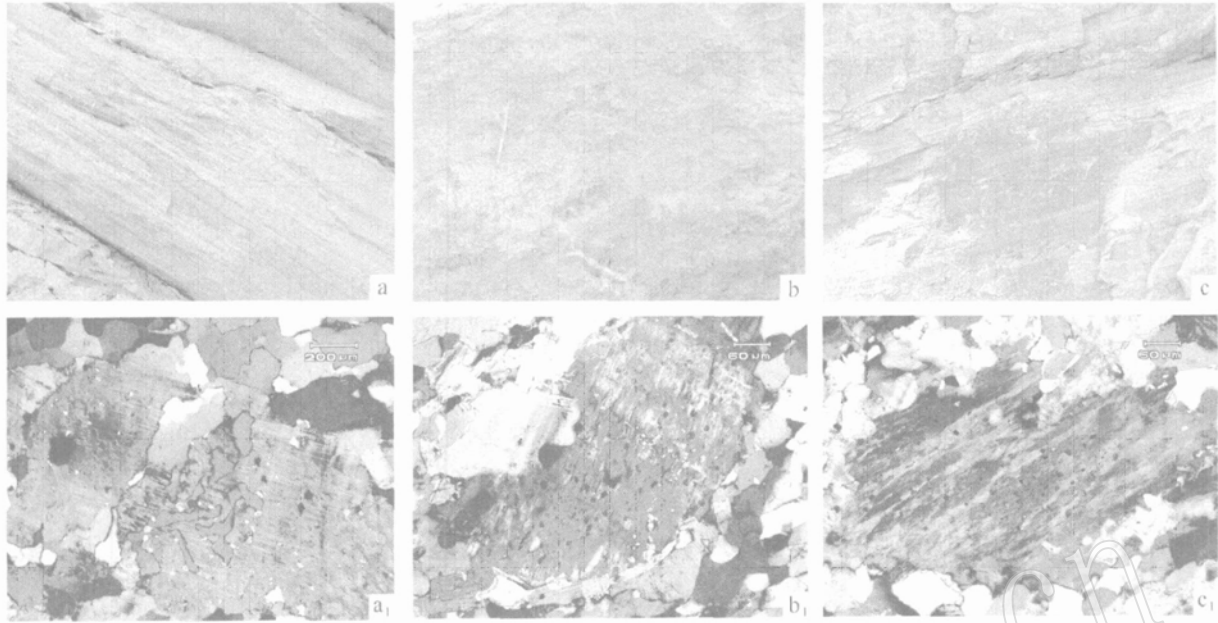


图3 高压变质岩片内片岩中主要矿物形态特征

Fig. 3 Shapes of major minerals in schists of high pressure slice

2.2 低温高压变质岩片

低温高压变质岩片主要由二长石英片岩、钠长石英片岩及少量呈团块状包裹于二长或钠长石英片岩中的钠长绿帘阳起石片岩组成。在该类岩石中常见很多定向排列、形态多样、轮廓分明、边界清晰、粒度约 $2\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 的浅色长英质团块或黑灰色绿泥石阳起石质团块,其长轴与岩石面理一致,可能为火山喷发的塑性岩屑脱玻化后的产物(图 3c)。二(钠)长石英片岩具有块状构造,变斑状、变余晶屑岩屑结构。主要矿物成分为钠长石、微斜长石、条纹长石、石英,次要矿物为多硅白云母,副矿物有磁铁矿、黄铁矿、磷灰石等,偶见石榴石、绿帘石、褐帘石、蓝透闪石、冻蓝闪石、阳起石等及榍石、文石、金红石等,变质程度达绿片岩相。部分钠长石、微斜长石粒度较粗、形态各异,边部呈港湾状、不规则状、长条状,具有火山晶屑的特征(图 3c₁),长英质塑性岩屑多已发生脱玻化,具球粒结构,呈透镜状、团块状或大小不等的集合体存在。钠长石英片岩的矿物组成与二长石英片岩的基本一致,其差别仅在于钾长石的含量,其原岩皆属石英角斑岩类,钠长绿帘阳起石片岩原岩为细碧岩类(樊金涛, 1995; 潘明宝等, 2003)。

3 高压变质带岩石地球化学性质

为了全面了解高压变质带变质岩原岩地球化学性质,本文分别对不同岩性段变质火山岩进行采样。其中,云母二长石英片岩 5 个,白云钠长石英片岩 4 个,二长石英片岩和钠长石英片岩 5 个。岩石的常量元素、微量元素和稀土元素分析在中国地质科学院测试中心完成,常量元素是用 X 射线荧光

光谱仪法测定(XRF),仪器为日本理光 3080E,并用等离子光谱法进行验证;微量元素 Th、Rb、Nb、Ta 和稀土元素采用等离子质谱仪测定(TJA_PQ_Excell),微量元素 Sr、Ba、V、Sc 用等离子光谱测定(IRIS),Zr 采用 X 荧光光谱法完成,仪器为 Rigaku_2100。分析结果见表 1。

3.1 中温高压变质岩片

云母二长石英片岩是中温高压变质岩片下部的主要岩石类型,其成分变化较小, SiO_2 含量变化于 $71.15\% \sim 78.02\%$, TFeO 为 $0.78\% \sim 4.88\%$ (平均 2.78%), Al_2O_3 在 $11.01\% \sim 13.65\%$ 区间内波动, A/NK 和 A/CNK 值都大于 1.0,在铝饱和指数图解上分布于过铝质花岗岩区, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 值较高,从 6.79% 到 8.49% ,与 SiO_2 含量呈正相关关系,且 Na_2O 含量多小于 K_2O 含量。该类岩石常量元素的另一个重要特点是 CaO 含量明显偏低,仅为 $0.11\% \sim 0.17\%$,而 TiO_2 含量远高于 0.1% ,从 0.11 到 0.45% (表 1), $A \cdot R$ 变化于 $3.24 \sim 7.41$,与 SiO_2 呈正相关关系,在 $A \cdot R - \text{SiO}_2$ 图解上位于碱性岩区。岩石的低钙、高硅、高碱、过铝质特征反映该类岩石原岩可能属于过铝质碱性流纹质火山岩类。 ΣREE 变化于 $101.61 \times 10^{-6} \sim 194.34 \times 10^{-6}$,与 SiO_2 含量基本上呈弱负相关关系, LREE/HREE 在 $2.22 \sim 8.82$ 之间, δEu 为 $0.13 \sim 0.41$,在稀土元素配分模式图上(图 4a),所有样品呈基本一致的向右倾斜的稀土元素配分曲线样式,并展现出 Eu 的强烈亏损。总体来看,该类岩石稀土元素具有轻稀土元素富集、分馏程度高,重稀土元素相对亏损、分馏程度低及 Eu 强烈亏损的特点。从微量元素蛛网图(图 5a)上可以看出 Sr、Ti、Sc 及 P(除 Z₈₄ 外)相对 MORB 亏损,大离子亲石元素 K、Rb、Ba、Th 相对 MORB 强烈富集, Rb、Th、Ce、Zr 和 Y 为正异常,

表 1 苏鲁地体南部高压变质带岩石化学成分
Table 1 Chemical compositions of schists in the high pressure metamorphic belt

位置 岩石类型 样号	中温高压变质岩片下段					中温高压变质岩片上段					低温高压变质岩片				
	云母二长石英片岩					白云钠长石英片岩					二(钠)长石英片岩				
	Z ₂₈	Z ₃₁	Z ₃₂	Z ₃₃	Z ₈₄	Z ₃₄	Z ₃₅	Z ₃₇	Z ₃₈	Z ₄₅	Z ₁₀₈	Z ₁₂₂	Z ₁₂₉	Z ₁₃₂	Z ₁₃₃
<i>w_B/%</i>															
SiO ₂	71.15	78.02	74.10	72.21	76.38	73.87	74.92	75.54	75.08	74.78	77.96	76.76	74.98	79.37	78.90
TiO ₂	0.45	0.11	0.43	0.38	0.27	0.17	0.14	0.15	0.18	0.21	0.16	0.30	0.34	0.25	0.18
Al ₂ O ₃	12.74	11.01	13.65	12.51	11.20	13.14	12.68	12.65	13.11	13.32	10.84	10.78	12.27	9.79	11.28
Fe ₂ O ₃	4.00	0.44	1.17	3.67	1.59	1.58	1.12	1.34	1.62	0.35	1.70	1.84	1.25	0.25	0.76
FeO	0.88	0.34	0.74	0.43	0.63	0.45	0.61	0.36	0.36	1.28	0.48	0.59	0.63	0.47	0.32
MnO	0.12	0.02	0.04	0.40	0.02	0.04	0.05	0.04	0.06	0.04	0.07	0.03	0.08	0.03	0.05
MgO	1.78	0.40	0.90	1.40	0.78	0.48	0.47	0.42	0.54	0.66	0.46	0.33	0.79	0.44	0.57
CaO	0.12	0.13	0.17	0.11	0.12	0.54	0.88	0.32	0.18	0.35	0.24	0.32	0.24	0.06	0.10
Na ₂ O	0.75	2.01	1.93	2.04	1.73	3.25	4.02	3.43	2.70	2.90	2.98	3.40	3.54	0.56	3.48
K ₂ O	6.04	6.48	6.35	5.31	5.65	5.11	3.52	5.20	5.32	4.47	5.11	4.94	5.08	8.27	4.04
P ₂ O ₅	0.09	0.02	0.09	0.03	0.07	0.03	0.03	0.03	0.02	0.11	0.01	0.02	0.04	0.02	0.01
H ₂ O ⁺	1.88	0.36	0.82	1.72	0.94	0.52	1.12	0.54	0.82	1.12	0.20	0.06	0.54	0.14	0.48
CO ₂	0.05	0.04	0.16	0.07	0.05	0.39	0.07	0.07	0.07	0.05	0.07	0.09	0.04	0.07	0.04
Total	100.05	99.38	100.55	100.28	99.43	99.57	99.63	100.09	100.06	99.64	100.28	99.46	99.82	99.72	100.21
A•R	3.24	7.41	3.99	3.79	4.75	4.14	3.50	4.98	4.04	3.34	6.41	7.04	5.43	18.31	3.24
TFeO	4.88	0.78	1.91	4.10	2.22	2.03	1.73	1.70	1.98	1.63	2.18	2.43	1.88	0.72	1.08
TFeO+ MgO	6.66	1.18	2.81	5.50	3.00	2.51	2.20	2.12	2.52	2.29	2.64	2.76	2.67	1.16	1.65
TFeO/MgO	2.74	1.95	2.12	2.93	2.85	4.23	3.68	4.05	3.67	2.47	4.74	7.36	2.38	1.64	1.89
(Na ₂ O+ K ₂ O)/CaO	56.58	65.31	48.71	66.82	61.50	15.48	8.57	26.97	44.56	21.06	33.71	26.06	35.92	147.17	75.20
A/NK	1.64	1.07	1.36	1.37	1.25	1.05	1.21	1.22	1.12	1.28	1.04	0.99	1.08	0.99	1.12
A/CNK	1.59	1.04	1.32	1.34	1.22	1.04	1.11	1.05	1.07	1.25	1.00	0.94	1.04	0.98	1.10
<i>w_B/10⁻⁶</i>															
La	30.7	18.9	43.3	35.5	21	52.7	64.1	54.1	55.2	49.9	49.8	52	63.1	20.2	19.5
Ce	56.1	30.6	82.3	65.4	39.4	118	124	102	110	97	119	126	127	46.4	50.3
Pr	6.62	3.56	9.19	7.7	4.7	11.5	13.5	11.5	11.6	10.5	10.4	17.1	14	5.38	5.84
Nd	25.2	13.3	32.8	29.1	17.5	39.9	48.1	40.3	41.3	36.6	32.9	69.8	53	18.8	21.5
Sm	5.22	3.26	6.25	5.78	3.5	8.22	9.33	8.02	8.08	7.21	7.13	16.6	9.77	3.69	6.05
Eu	0.7	0.17	0.81	0.68	0.31	0.56	0.57	0.51	0.51	0.55	0.64	2.38	1.32	0.37	0.59
Gd	5.09	4.71	5.59	5.34	3.63	7.99	9.03	7.85	8	7.26	7.89	13.9	9.4	3.3	6.78
Tb	0.92	1.23	0.91	0.94	0.81	1.51	1.65	1.42	1.46	1.29	1.56	2.27	1.55	0.63	1.41
Dy	5.2	9.1	4.94	5.63	5.63	9.35	9.98	8.6	8.84	7.9	10.4	12.1	8.91	4.32	10.2
Ho	1.09	2.01	1	1.26	1.25	1.96	2.12	1.82	1.92	1.67	2.43	2.29	1.84	1.1	2.3
Er	3.45	6.6	3.28	4.14	4.25	6.51	6.95	5.93	6.12	5.67	8.22	7.01	5.72	4.39	7.56
Tm	0.51	1.01	0.46	0.59	0.66	0.98	1.07	0.9	0.95	0.88	1.4	1.03	0.8	0.77	1.14
Yb	3.34	6.29	3.06	3.8	4.5	6.71	7.11	6.1	6.52	5.92	9.79	6.88	5.51	5.81	7.91
Lu	0.5	0.87	0.45	0.57	0.64	0.97	1.03	0.87	0.92	0.88	1.6	1.07	0.8	0.94	1.19
∑REE	144.64	101.61	194.34	166.43	107.78	266.86	298.54	249.92	261.42	233.23	263.16	330.43	302.72	116.1	142.27
LREE/HREE	6.08	2.22	8.82	6.45	4.16	2.77	3.18	3.34	3.91	6.36	5.10	6.13	7.74	4.56	2.72
δEu	0.41	0.13	0.41	0.37	0.26	0.21	0.19	0.19	0.19	0.23	0.26	0.47	0.42	0.32	0.41
Sr	9.35	41.20	23.90	38.90	19.50	48.40	46.30	41.80	50.90	45.90	20.60	13.50	19.90	22.00	12.80
Rb	205.00	163.00	179.00	194.00	174.00	216.00	139.00	209.00	213.00	180.00	148.00	105.00	121.00	139.00	97.10
Ba	408.00	364.00	349.00	605.00	331.00	435.00	363.00	409.00	415.00	405.00	427.00	336.00	403.00	474.00	320.00
Th	6.96	9.62	8.88	7.55	6.17	20.60	20.80	21.20	22.60	18.30	19.00	9.18	6.44	9.00	12.70
Nb	18.50	21.10	8.93	19.60	16.80	28.20	24.00	24.90	25.40	22.70	42.90	23.00	17.90	28.30	29.40
Zr	222.00	177.00	282.00	242.00	292.00	200.00	184.00	175.00	188.00	188.00	599.00	647.00	395.00	632.00	494.00
Y	33.00	71.00	31.60	45.30	38.50	59.00	66.70	58.10	57.30	52.50	78.90	68.90	55.30	36.70	69.60
Sc	7.15	1.85	6.91	6.88	4.23	5.49	4.29	4.46	4.94	3.32	5.66	5.92	5.26	4.98	4.89
Ta	1.27	2.10	0.53	1.29	1.27	2.25	2.00	2.00	2.07	2.07	1.93	1.34	1.01	1.23	1.71
V	65.40	6.77	50.10	48.90	30.20	7.61	6.94	6.59	10.70	15.60	8.11	7.73	9.77	6.51	6.41
Hf	7.87	9.23	8.91	8.84	11.40	8.89	8.33	7.04	7.35	7.66	20.80	16.50	10.60	10.90	12.80
Yb+ Ta	4.61	8.39	3.59	5.09	5.77	8.96	9.11	8.10	8.59	7.99	11.72	8.22	6.52	7.04	9.62
Y+ Nb	51.50	92.10	40.53	64.90	55.30	87.20	90.70	83.00	82.70	75.20	121.80	91.90	73.20	65.00	99.00
Zr+ Nb+ Ce+ Y	329.6	299.7	404.8	372.3	386.7	405.2	398.7	360.0	380.7	360.2	839.8	864.9	595.2	743.4	643.3

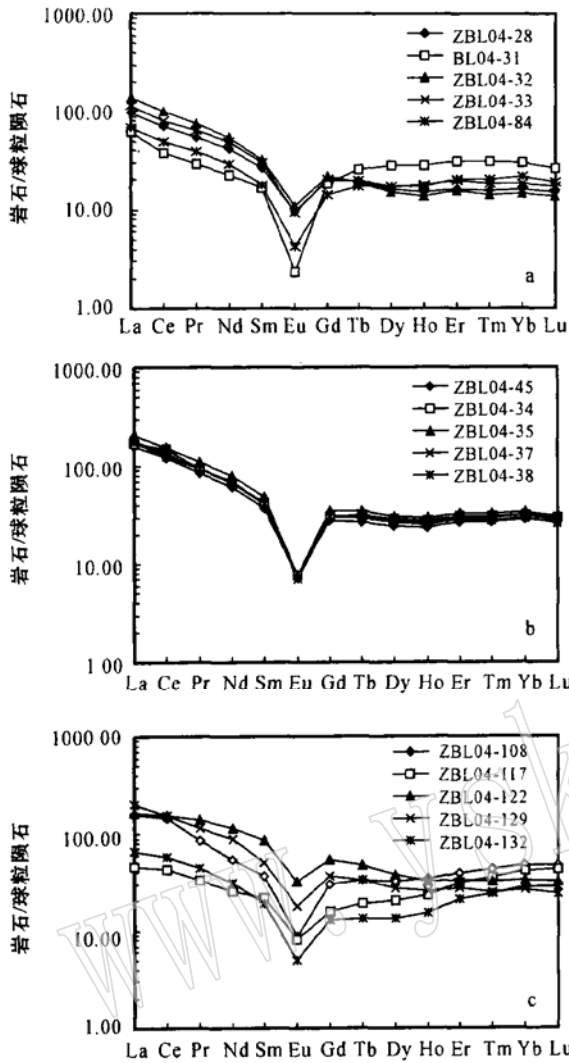


图 4 高压变质带变质火山岩稀土元素配分模式
 Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns of metamorphic volcanic rocks

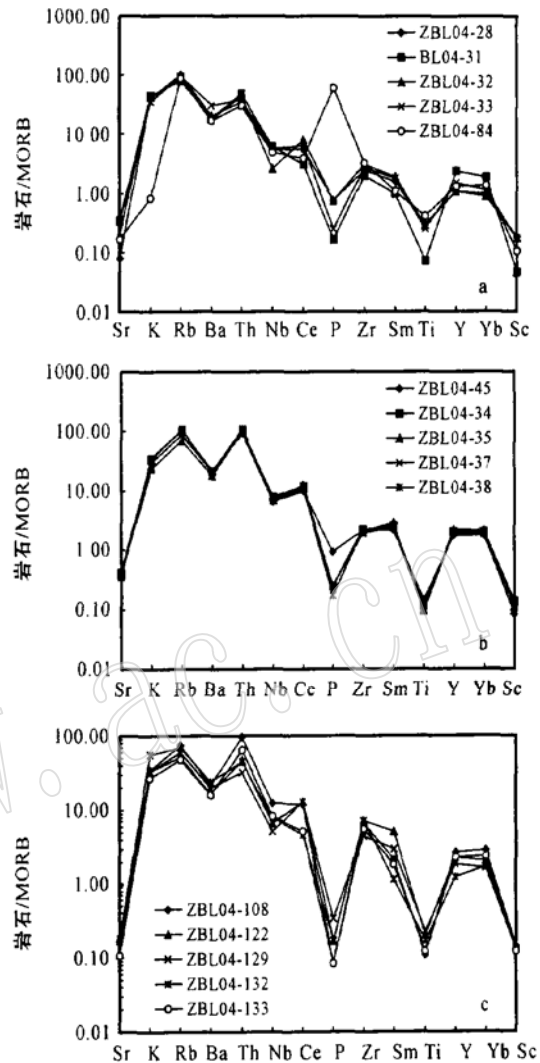


图 5 高压变质带变质火山岩微量元素蛛网图
 Fig. 5 MORB normalized spidergrams of metamorphic volcanic rocks

Ba、Nb、P、Ti 为明显的负异常。

白云钠长石英片岩位于中温高压变质岩片上部，其成分变化较小，SiO₂ 含量变化于 73.87% ~ 75.54%，TFeO 为 1.63% ~ 2.03%，平均 1.81%，Al₂O₃ 在 12.65% ~ 13.32% 区间内波动，A/NK 和 A/CNK 值都大于 1.0，在铝饱和指数图解上分布于过铝质花岗岩区，Na₂O+K₂O 值较高，从 7.37% 到 8.63%，与 SiO₂ 含量呈正相关关系，Na₂O/K₂O 值除 Z₃₅ 外都小于 1.0。该类岩石常量元素的另一个重要特点是 CaO 含量明显偏低，仅为 0.18% ~ 0.35%，而 TiO₂ 含量远高于 0.1% (表 1)，岩石中 Na₂O 含量相对云母二长石英片岩有所增高，可能与岩石中钠长石含量有关。A·R 变化于 3.34 ~ 4.98，与 SiO₂ 呈正相关关系，在 A·R - SiO₂ 图解上位于碱性岩区。由此可见，该类岩石原岩与云母二长石英片岩原岩性质相似，为碱性过铝质酸性火山岩。ΣREE 变化于 233.23 ×

10⁻⁶ ~ 266.86 × 10⁻⁶，与 SiO₂ 含量基本上呈弱负相关关系，LREE/HREE 在 2.77 ~ 6.36 之间，δEu 为 0.19 ~ 0.23。在稀土元素配分模式图上 (图 4b)，所有样品均呈向右倾斜的稀土元素配分曲线样式，并展现出 Eu 的强烈亏损，说明岩石具有轻稀土元素富集、分馏程度高，重稀土元素相对亏损、分馏程度低及 Eu 强烈亏损的特点。微量元素组成及蛛网图 (图 5b) 也展现出与云母二长石英片岩相似的地球化学变化特征。

3.2 低温高压变质岩片

二 (钠) 长石英片岩位于中温高压变质岩片上部，其间为韧性剪切带接触。岩石成分相对稳定，SiO₂ 含量变化于 74.98% ~ 79.37%，TFeO 为 0.72% ~ 2.43%，平均 1.66%，Al₂O₃ 在 9.79% ~ 12.27% 区间内波动，A/NK 和 A/CNK 值在 1.0 附近，Na₂O+K₂O 值较高，从 7.52% 到 8.83%，Na₂O/K₂O 值都小于 1.0，可能与岩石中多硅白云母有关。该类岩

石常量元素中的 CaO 含量仅为 0.06%~0.32%，而 TiO₂ 含量远高于 0.1% (表 1)，Na₂O 含量与白云钠长石英片岩基本一致，A·R 变化于 4.9~18.31，与 SiO₂ 呈正相关关系，在 A·R-SiO₂ 图解上位于碱性岩区，说明该类岩石原岩为偏铝质碱性流纹质火山岩。ΣREE 变化于 116.10×10⁻⁶~330.43×10⁻⁶，与 SiO₂ 含量基本上呈弱负相关关系，LREE/HREE 在 2.72~6.13 之间，在稀土元素配分模式图上 (图 4c)，所有样品同样具有向右倾斜的稀土元素配分曲线样式，并展现出 Eu 相对亏损，轻稀土元素富集、分馏程度高，重稀土元素相对亏损、分馏程度低及 Eu 相对亏损的特点。从微量元素蛛网图 (图 5c) 上可以看出该类岩石中微量元素变化特征与白云钠长石英片岩相似，仅 P 的负异常强度更明显一些。

综上所述，苏鲁高压-超高压变质带南部高压变质带内不同类型变质火山岩原岩地球化学性质既存在一定的相似性，又存在一定的差别。其共同点是三类变质火山岩都具有高硅、高碱、低钙，轻稀土元素富集、分馏程度高，重稀土元素亏损、分馏程度低，Eu 强到中度亏损，稀土元素配分曲线形态基本一致及 Nb、P、Ti 负异常，在 (K₂O+Na₂O)/CaO-Zr+ Nb+ Ce+ Y 图解 (Whalen *et al.*, 1987) 上都位于 A 型区 (图 6)，展示出明显的 A 型火成岩特征 (Eby, 1990)。同时，三类变质火山岩亦存在一些非常明显的差别。从底部的云母二长石英片岩经白云钠长石英片岩到二 (钠) 长石英片岩，SiO₂ 含量逐渐增加，A/NK 和 A/CNK 值逐渐减小，岩石性质由过铝质向偏铝质演变；K₂O 含量逐渐减少，Na₂O 含量逐渐增加，可能与钠长石在岩石矿物组成中所占比例相对增多有关，反映各变质岩原岩在形成或后期的变质演变过程存在一些差异。

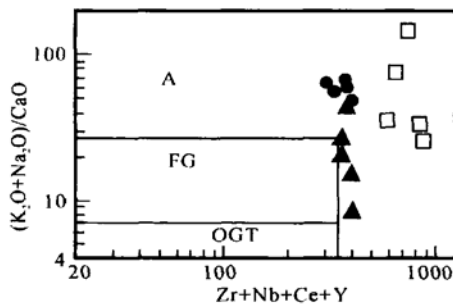


图 6 (K₂O+Na₂O)/CaO-Zr+ Nb+ Ce+ Y 图解 (Whalen *et al.*, 1987)

Fig. 6 (K₂O+Na₂O)/CaO versus Zr+ Nb+ Ce+ Y diagram (Whalen *et al.*, 1987)

A—A 型花岗岩类；OGT—I, S, M 型花岗岩类；FG—分异的 I 型花岗岩类；●—云母二长石英片岩；▲—白云钠长石英片岩；□—二 (钠) 长石英片岩

A—A_{type} granitoids; OGT—I, S, and M_{type} granitoids; FG—fractionated I_{type} granitoids; ●—mica feldspar quartz schist; ▲—phengite feldspar quartz schist; □—feldspar or albite quartz schist

4 讨论与结论

4.1 变质岩原岩性质

樊金涛 (1995)、潘明宝等 (2003) 对该带变质岩进行了研究，认为中温高压变质岩片内的岩石为一套形成于陆缘陆棚海环境的碎屑化学沉积岩，低温高压变质岩片内的二 (钠) 长石英片岩的原岩为一套形成于活动性大陆边缘的火山碎屑沉积岩或石英角斑岩。即认为云母二长石英片岩和白云钠长石英片岩原岩为一套浅海相泥砂质沉积岩，二 (钠) 长石英片岩的原岩为海底火山岩-石英角斑岩。实际情况是否如此？从野外观察和镜下鉴定及地球化学资料分析认为将二 (钠) 长石英片岩的原岩确定为石英角斑岩是客观的，而对云母二长石英片岩和白云钠长石英片岩的认识有待于进一步商榷。从岩石中长石斑晶的类型、形态、结构及内部矿物包裹体类型、分布并结合锆石内部结构的观察分析对比，发现云母二长石英片岩和白云钠长石英片岩的结构及长石斑晶特征等与二 (钠) 长石英片岩相近以及锆石内部结构及该矿物中的 Th/U 比值 > 0.5 都展示出明显地岩浆成因性质。此外，岩石变质程度仅达高绿片岩相，若为泥沙质沉积岩，则岩石内应该或多或少地保留沉积岩特有的层理、纹理及砂屑等痕迹，但野外和镜下观察均未发现这些证据。据此，推断其原岩为火成岩。从岩石地球化学角度分析，三类岩石的常量元素组成、稀土元素和微量元素特征基本一致，并与 Iberia 西南 Ossa-Morena 带内酸性过铝质流纹岩 (Sanchez-Garcia *et al.*, 2003) 相似，也说明它们的原岩应为火山岩，其岩浆可能来源于相同或相似的原区，其岩石类型属偏铝-过铝质碱性流纹质火山岩类。

4.2 变质岩原岩形成环境及构造意义

Loiselle & Wones (1979) 将高碱、高 TFeO/MgO 和低钙、形成于非造山环境的花岗岩定义为 A 型花岗岩，Eby (1990) 和 King 等 (1997) 又先后将其拓宽到偏铝质-过铝质，形成于造山后和非造山两种环境的花岗岩类。本区变质火山岩原岩是在哪种环境下形成的呢？樊金涛 (1995) 根据高压变质带内酸性火山岩中夹有基性岩，即由细碧角斑岩和石英角斑岩组成双峰特征及其地球化学成分推断其原岩形成于陆内裂谷-海州裂陷槽，而周建波等 (2001) 和潘明宝等 (2003) 通过对二 (钠) 长石英片岩的同位素年代学和氧同位素等的研究，认为该类变质岩原岩形成于活动大陆边缘环境。为此，笔者对变质带内三种石英片岩的部分常量元素和微量元素进行图解分析，在 Pearce 等 (1984) Rb-Yb-Ta 图解 (图 7a) 和 Rb-Y-Nb 图解 (图 7b) 上位于板内环境区，与 Iberia 西南 Ossa-Morena 带内酸性过铝质流纹岩 (Sanchez-Garcia *et al.*, 2003) 及南非 Rooiberg 流纹岩 (Twist & Harmer, 1987) 一致，而与形成于岛弧环境的白银酸性火山岩 (Wang *et al.*, 2005) 明显不同。在 Maniar & Piccoli (1989) 的 Al₂O₃-SiO₂ 图解中部分落入后造山环境区，部分落入与裂谷有关的 (RRG) 和与大陆造陆抬

升有关的(CEUG)环境区(图 7c), 在 $MgO + TFeO - CaO$ 图解中完全落入与裂谷有关的(RRG)和与大陆造陆抬升有关的(CEUG)区(图 7d)。结合岩石微量元素中 Nb、Ba 呈明显负异常和 Sr、P、Ti 强烈亏损(图 5)的特点分析认为区内三类岩石原岩应形成于板内与裂谷有关的非造山环境。

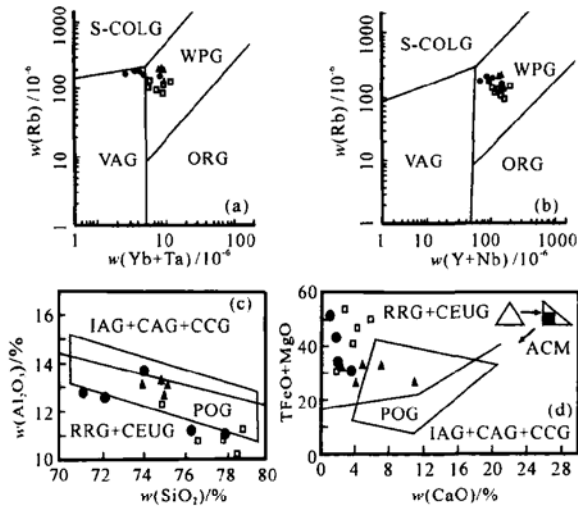


图 7 变质火山岩构造环境判别图解

Fig. 7 Discrimination of tectonic environments for the metamorphic volcanic rocks

VAG—火山弧花岗岩; S—COLG—同碰撞花岗岩; WPG—板内花岗岩; ORG—洋脊花岗岩; IAG—岛弧花岗岩类; CAG—大陆弧花岗岩类; CCG—大陆碰撞花岗岩类; POG—碰撞后花岗岩类; RRG—洋脊花岗岩类; CEUG—大陆隆升花岗岩类; 图例同图 6

VAG—volcanic arc granite; S—COLG—syn collision granite; WPG—intraplate granite; ORG—oceanic rift granite; IAG— island arc granitoids; CAG—continental arc granitoids; CCG—continental collision granitoids; POG—post orogenic granitoids; RRG—rift related granitoids; CEUG—continental epirogenic uplift granitoids; Legends as for Fig. 6

云母二长石英片岩原岩形成时代为 814 Ma(戚学祥等, 2005), 二(钠)长石英片岩原岩锆石 SHRIMP U-Pb 同位素平均年龄为 781 Ma(待刊)。从苏鲁高压变质带下部到上部三种类型变质火山岩的分布说明, 该区在 814 Ma 到 781 Ma 期间先后经历了 3 次间歇性的海底火山喷发活动。Rodinia 大陆于中元古代晚期—新元古代(1800~1000 Ma)完成拼合, 于 900~700 Ma 发生大规模裂解(Hoffman, 1991; Torsvik *et al.*, 1996; Li *et al.*, 1995, 1996; Weil *et al.*, 1998)。位于 Rodinia 大陆内部的扬子地块也不例外, 在这一期间内也完成了一系列裂解作用, 从 Rodinia 脱离出来, 在其内部形成一系列规模不等的陆内裂谷, 并诱发大量火山喷发(Hoffman, 1991; Li *et al.*, 1995; 1996; 陆松年, 1998; 张文治, 2001)。本区 3 次火山喷发活动时间就在扬子内部一系列裂谷形成期间, 是一系列扬子裂谷形成时的一部分, 与 A 型花岗岩形成

于拉张构造环境(King *et al.*, 1997; Eby, 1990; 洪大卫等, 1995; 王德滋等, 1995)的特点一致。由此可见, 苏鲁高压变质带内三种变质火山岩的形成标志着该区在新元古代处于拉张环境, 形成于扬子地块裂解作用发育时期。

References

- Ames L, Zhou G and Xiong B. 1996. Geochronology and geochemistry of ultrahigh pressure metamorphism with implication for collision of the sino-Korean and Yangtze cratons, central China[J]. *Tectonics*, 15: 422~489.
- Claesson V S, Vetrin T and Bayanova H D. 2000. U-Pb zircon ages from a Devonian carbonatite dyke, Kola Peninsula, Russia: a record of geological evolution from the Archean to the Palaeozoic [J]. *Lithos*, 51: 95~108.
- Eby G N. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis [J]. *Lithos*, 26: 115~134.
- Fan Jintao. 1995. The petrogenesis of the spilite-keratophyre sequence of the Haizhou group in northern Jiansu [J]. *Regional Geology of China*, (2): 118~124 (in Chinese).
- Hanchar J M and Miller C F. 1993. Zircon zonation patterns as revealed by cathodoluminescence and backscattered electron images [J]. *Chemical Geology*, 110: 1~13.
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, *et al.* 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh pressure Qinling-Dabie Orogen, China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 161: 215~230.
- Hoffman P F. 1991. Did the breakout of Laurentia turn Gondwanaland inside out [J]? *Science*, 252: 1406~1412.
- Hong Dawei, Wang Shiguang, Han Baofu, *et al.* 1995. Classification and mark of tectonic environment for alkaline granite [J]. *Science in China (B)*, 25: 261~270.
- Hoskin P W O and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis [A]. Hanchar J M, Hoskin P W O. *Reviews in Mineralogy (Geochemistry (zircon))* [C], 53: 27~62.
- King P L, White A J R, Chappell B W, *et al.* 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia [J]. *J. Petrology*, 38: 371~391.
- Li Z X, Zhang L and Powell C M A. 1995. South China in Rodinia: part of the missing link between Australia—East Antarctica and Laurentia [J]? *Geology*, 23(5): 407~410.
- Li Jinyi, Yang Tiannan, Chen Wen, *et al.* 2004. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of deformation events and reconstruction of exhumation of ultrahigh-pressure metamorphic rocks in Donghai, east China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 97~108 (in Chinese).
- Li Z X, Zhang L and Powell C M A. 1996. Breakup of Rodinia and Gondwanaland and assembly of Asia [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 43: 591~592.
- Liu Fulai, Xu Zhiqin and Song Biao. 2003. Determination of UHP and retrograde metamorphic ages of the Sulu terrane: evidence from SHRIMP U-Pb dating on zircons of gneissic rocks [J]. *Acta Geologica Sinica*, 77: 69~84 (in Chinese).
- Liu F L, Xu Z Q and Liu J G. 2004. Tracing the boundary between UHP and Hp metamorphic belts in the southwestern Sulu terrane, eastern China: evidence from mineral inclusions in zircons from

- metamorphic rocks[J]. *International Geology Review*, 46: 409~425.
- Loiselle M C and Wones D R. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites[J]. *Geol. Soc. Am. Abstr. Programs*, 11: 468.
- Lu Songnian. 1998. A review of advance in the research on the neoproterozoic Rodinia supercontinent[J]. *Geological Review*, 44(5): 489~495(in Chinese).
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 635~ 643.
- Pan Mingbao, Chen Huogen, Xie Aiguo, *et al.* 1995. Tectonic deformation and origin of tongue_like gneiss in the Jinping area, northern Jiangsu[J]. *Geology in China*, 30(4): 382~ 387(in Chinese).
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *J. Petrol.* 25: 956~ 983.
- Qi Jinzhong, Qi Xuexiang and Chen Fangyuan. 2005. characteristics of the Nangang- Gaogongdao ductile shear zone in the south Sulu high_pressure metamorphic belt and EBSD fabric analysis of quartz [J]. *Geology in China*, 32(2): 289~ 298(in Chinese).
- Qi Xuexiang, Xu Zhiqin, Qi Jinzhong, *et al.* 2005. Contact relationship between high pressure and ultrahigh pressure metamorphic belts at the southern Sulu high pressure_ultrahigh pressure metamorphic terrane, and its geological significance[J]. *Geology in China*, 32(2): 276~ 286 (in Chinese).
- Qiu Haijun, Xu Zhiqin, Zhang Jianxin, *et al.* 2003. The discovery of glaucophane green schist facies rock mass in Lianyungang, northern jiangsu[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(1): 34~ 40 (in Chinese).
- Sanchez_Garcia T, bellido F and Quesada C. 2003. Geodynamic setting and geochemical signatures of Cambrian- ordovician rift_related igneous rocks (Ossa morena Zone, SW Iberia) [J]. *Tectonophysics*, 365: 233~ 255.
- Torsvik T H, Smethurst M A, Meert J G, *et al.* 1996. Continental breakup and collision in the Neoproterozoic and Paleozoic—a tale of Baltica and Laurentia[J]. *Ear. Sci. Rev.*, 40: 229~ 258.
- Twist D and Harmer R E J. 1987. Geochemistry of contrasting siliceous magmatic suites in the Bushveld complex: genetic aspects and implications for tectonic discrimination diagrams[J]. *J. Volcanology and Geothermal Research*, 32: 83~ 98.
- Wang Dezi, Zhao Guangtao and Qiu Jiansheng. 1995. tectonic constrains on A_type granites in upper Mesozoic, eastern China[J]. *Geological Journal of Universities*, 1(2): 13~ 21(in Chinese).
- Wang Y C, Zhang Q, Qian Q, *et al.* 2005. geochemistry of the early Paleozoic baiyin volcanic rocks (NW China): implications for the tectonic evolution of the north Qilian orogenic belt[J]. *The Journal of Geology*, 113: 83~ 94.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A_type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contrib. Mineral Petrol.*, 95: 407~ 419.
- Weil A B, Van der Voo R, MaCniocal C, *et al.* 1998. The Proterozoic supercontinent Rodinia: Paleomagnetically derived reconstructions for 1100 to 800Ma[J]. *Earth planet Sci. lett.*, 154: 13~ 24.
- Xu Zhiqin, Zhang Zeming, Liu Fulai, *et al.* 2003. Exhumation structure and mechanism of the Sulu ultrahigh_pressure metamorphic belt, central china[J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(4): 433~ 450(in Chinese).
- Xu Huifen, Yang Tiannan, Liu Fulai, *et al.* 2001. Multi age- time evolution of granite gneisses- granit in the Southern Sulu HP_UHP metamorphic belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 75(3): 371~ 387(in Chinese).
- Yu Jinhai, Wang Ciyin and Lin Liming. 2001. The nature of HP metamorphic zone and its relationship with the UHP metamorphic zone in northern Jiangsu, China. *Acta Geologica Sinica*, 75(1): 82~ 90 (in Chinese).
- Zhang R Y, Liou J G and Shu J F. 2002. Hydroxy_rich topaz in high_pressure and ultrahigh_pressure kyanite quartzites, with retrograde woodhouseite, from the Sulu terrane, eastern China[J]. *American Mineralogist*, 87: 445~ 453.
- Zhang R Y, Liou J G, Yang J S, *et al.* 2003. Ultrahigh_pressure metamorphism in the forbidden zone: the Xugou garnet peridotite, Sulu terrane, eastern China[J]. *J. metamorph. Geol.*, 21: 539~ 550.
- Zhang Wenzhi. 2001. Review: Paleomagnetic record of Rodinia supercontinental amalgamation and breakup[J]. *Progress in Precambrian Research*, 24(4): 222~ 236(in Chinese).
- Zhou Jianbo, Zhang Yongfei, Li Long, *et al.* 2001. On low_grade metamorphic rock within Dabie- Sulu ultrahigh pressure metamorphic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 39~ 48(in Chinese).

附中文参考文献

- 樊金涛. 1995. 苏北海州群细碧角闪岩系的成因[J]. *中国区域地质*, (2): 118~ 124.
- 洪大卫, 王式浣, 韩宝福, 等. 1995. 碱性花岗岩的构造环境分类及其鉴别标志[J]. *中国科学(B辑)*, 25: 261~ 270.
- 李锦轶, 杨天南, 陈文, 等. 2004. 中国东部东海地区超高压变质岩构造变形事件的⁴⁰Ar/³⁹Ar定年与超高压变质岩折返过程的重建[J]. *地质学报*, 78(1): 97~ 108.
- 刘福来, 许志琴, 宋彪. 2003. 苏鲁地体超高压和退变质时代的厘定: 来自片麻岩锆石微区 SHRIMP U_Pb 定年的证据[J]. *地质学报*, 77: 69~ 84.
- 陆松年. 1998. 新元古时期 Rodinia 超大陆研究进展评述[J]. *地质论评*, 44(5): 489~ 495.
- 潘明宝, 陈火根, 解爱国, 等. 2003. 苏北锦屏地区构造变形及片麻岩舌状体成因研究[J]. *中国地质*, 30(4): 382~ 387.
- 齐金忠, 戚学祥, 陈方远. 2005. 南苏鲁高压变质带南岗-高公岛韧性剪切带及 EBSD 石英组构[J]. *中国地质*, 32(2): 287~ 298.
- 戚学祥, 许志琴, 齐金忠, 等. 2005. 苏鲁高压-超高压变质地体南部高压与超高压变质带原岩的接触关系及其地质意义[J]. *中国地质*, 32(2): 276~ 286.
- 邱海峻, 许志琴, 张建新, 等. 2003. 苏北连云港地区蓝闪绿片岩相岩块的发现[J]. *岩石矿物学杂志*, 22(1): 34~ 40.
- 王德滋, 赵广涛, 邱检生. 1995. 中国东部晚中生代 A 型花岗岩的构造制约[J]. *高校地质学报*, 1(2): 13~ 21.
- 许志琴, 张泽明, 刘福来, 等. 2003. 苏鲁高压-超高压变质带的折返构造及折返机制[J]. *地质学报*, 77(4): 433~ 450.
- 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[J]. *地质学报*, 75(3): 371~ 387.
- 于津海, 王赐银, 林黎明. 2001. 苏北高压变质带及其与北侧超高压变质带的关系[J]. *地质学报*, 75(1): 82~ 90.
- 张文治. 2001. 述评: Rodinia 超大陆拼合和裂解的古地磁检验[J]. *前寒武纪研究进展*, 24(4): 222~ 236.
- 周建波, 郑永飞, 李龙. 2001. 大别-苏鲁超高压变质带内部的浅变质岩[J]. *岩石学报*, 17(1): 39~ 48.