

# 胶南岚山头地区 A 型花岗质片麻岩的 地球化学特征与原岩成因

周开富, 薛怀民, 刘福来

(中国地质科学院地质研究所大陆动力学实验室 北京 100037)

**摘要** 胶南岚山头地区花岗质片麻岩的化学成分表现为  $\text{SiO}_2$  含量普遍高, 为 68.4% ~ 78.26%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 11.34% ~ 15.84%, 而  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{MnO}$  和  $\text{MgO}$  的含量明显偏低, 其中  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  为 0.69% ~ 2.12%,  $\text{FeO}$  为 0.18% ~ 1.56%,  $\text{MgO}$  为 0.05% ~ 1.53%, 岩石明显富含  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  强烈贫  $\text{CaO}$ , 其中  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  的含量为 8.32% ~ 10.33%,  $\text{K}_2\text{O}$  的含量为 3.87% ~ 5.24%,  $\text{CaO}$  的含量为 0.19% ~ 1.27%。稀土元素配分模式显示轻稀土明显富集、重稀土相对平坦, 具有较强的轻、重稀土元素分馏和强烈-中等的负 Eu 异常。具强烈富集大离子亲石元素 (K、Rb、Ba、Th) 的特点, 高场强元素 Ti、Nb 和 Ta 显示明显负异常, 且所有样品均具明显负 P 异常。花岗质片麻岩的原岩为 A 型花岗岩, 指示其形成于拉张作用下的陆缘火山弧构造环境, 原岩可能为新元古代下地壳富钾的变质玄武岩部分熔融而成, 形成压力为 0.8 ~ 1.0 GPa, 部分熔融程度小于 10%。胶南 A 型花岗质片麻岩的原岩形成于新元古代, 与扬子板块北缘新元古代陆缘火山活动有关, 可能是 Rodinia 超大陆裂解事件在苏鲁地区的强烈反响。

**关键词** A 型花岗质片麻岩 地球化学特征 原岩成因 苏鲁地体

中图分类号: P588.34<sup>+</sup>5; P581

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2007)02-0109-14

## Geochemical characteristics of A-type granitic gneiss in Lanshantou of Jiaonan and the genesis of its protolith

ZHOU Kai-fu, XUE Huai-min and LIU Fu-lai

(Key Laboratory for Continental Dynamics of Ministry of Land and Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

**Abstract:** Chemical components of Jiaonan granitic gneiss indicate that  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  contents of the samples range from 68.4% to 78.2% and from 11.34% to 15.84%, respectively.  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MnO}$  and  $\text{MgO}$  contents are obviously low;  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0.69\% \sim 2.12\%$ ,  $\text{FeO} = 0.18\% \sim 1.56\%$  and  $\text{MgO} = 0.05\% \sim 1.53\%$ .  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  contents of the rock are high and  $\text{CaO}$  is evidently low, with  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  being 8.32% ~ 10.33%,  $\text{K}_2\text{O}$  3.87% ~ 5.24%, and  $\text{CaO}$  0.19% ~ 1.27%. The REE patterns are characterized by obvious enrichment of light rare earth elements, clear deficiency of heavy rare earth elements, and medium-intense negative Eu anomalies. In the MORB normalized multi-element variation diagram, multi-element variations show the relative concentration of K, Rb, Ba and Th, evident depletion of Ti, Nb and Ta, and clear negative P anomalies. The protolith of granitic gneiss in Jiaonan belongs to A-type granite formed in volcanic arc tectonic surroundings under the action of tensional force. The source rock of A-type granite might have been derived from partial melting of the lower crust K-rich metabasalt formed in Neoproterozoic. It was formed at the temperature up to 1000°C, pressure from 0.8 GPa to 1.0 GPa, and partial melting degree lower than 10%. The formation of A-type gran-

收稿日期: 2006-06-14; 修订日期: 2006-09-22

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2003CB716502); 国家自然科学基金重大项目(40399143); 中国地质调查局地质大调查项目(121201056606)

作者简介: 周开富(1965-), 男, 硕士, 岩石学矿物学与矿床学专业, 现从事变质岩石学研究, 电话: 010-68992873, E-mail: liufulai@ccsdl.cn

ite might have been related to the volcanic arc activity on the northeast margin of the Yangtze block in Neoproterozoic, which is supposed to be the reflection of the Neoproterozoic Rodinia supercontinent breakup event in Sulu area.

**Key words:** A-type granitics gneiss; geochemical characteristics; genesis of the protolith; Sulu terrane

片麻岩是苏鲁超高压变质带中出露最广泛的岩石类型,占该带变质岩出露面积的90%以上。而花岗质片麻岩类又占了其中的绝大部分,包括奥长花岗质、二长花岗质、碱性花岗质、花岗闪长质和云英闪长质等多种类型(Zhai *et al.*, 1994; 郑祥身等, 1999; Xue *et al.*, 2001)。有关花岗质片麻岩的成因目前还存在不同的观点,部分研究者认为是由黑云斜长片麻岩等在退变质过程中发生部分熔融、深熔,经钾交代形成(钟增球等, 1999; 凌文黎等, 2000; 游振东等, 2004),多数研究者认为花岗质片麻岩是由形成于新元古代的侵入岩经超高压(高压)变质形成(江世俊等, 1995; 李永刚等, 1999; 郑祥身等, 1999; 樊金涛, 2000; 刘晓春等, 2001; Liu *et al.*, 2001; Xue *et al.*, 2001; 孙海婷等, 2002; 刘福来等, 2004)。含霓石、霓辉石等碱性暗色矿物的A型花岗质片麻岩在大别山和苏鲁地区都有发现(刘建文等, 1997; 徐树桐等, 1998; 樊金涛, 2000, 2001)。由于它们特殊的产出环境,对于揭示扬子地台北缘晚元古代的构造属性无疑具有重要意义。但前人对苏鲁地区A型花岗质片麻岩的研究主要集中在它们形成的构造环境方面,如刘建文等(1997)描述了岚山头花岗质片麻岩具有A型花岗岩特征,说明它们产生在张性构造环境下;樊金涛(2000)分析了东海牛山、宋山、踢球山等A型花岗质片麻岩的地球化学特征,并根据同位素年龄阐明它们形成于不同地质时代的拉张环境。至于这些A型花岗质片麻岩的原岩性质、形成条件、与苏鲁超高压变质带中其他类型花岗质片麻岩的关系等都未能涉及,而上述问题的解决可以为揭示扬子地台北缘晚元古代的构造属性提供重要依据。针对上述存在问题,本文主要以胶南岚山地区出露的含霓石碱性A型花岗质片麻岩为研究对象,重点开展碱性花岗质片麻岩的地球化学性质的研究,探讨其原岩可能的物质来源和形成条件及其形成构造环境,并通过与南苏鲁其他类型花岗质片麻岩的地球化学特征对比,探讨苏鲁超高压变质带中花岗片麻岩原岩形成大地构造背景。

## 1 区域地质背景

研究区位于苏鲁造山带的南苏鲁地块江苏石桥—山东岚山头一带(图1)。构造上南苏鲁地块分为北部的超高压变质带和南部的高压变质带两个单元,研究区即位于北部的超高压变质带内。超高压变质带中出露的主要岩石类型为新元古代花岗片麻岩、变质镁铁—超镁铁质侵入岩、变质表壳岩(黑云斜长片麻岩、石英岩)等及燕山期花岗岩,碱性花岗质片麻岩的分布区域较小。胶南岚山头地区出露13个碱性花岗质片麻岩—含霓石的花岗片麻岩露头,一般零星分布于新元古代花岗质片麻岩和燕山期花岗质片麻岩之中,呈突变接触或断层接触关系,长×宽为500 m×1 000 m~8 km×10 km,形状不规则,岩体总体走向与区域构造线一致。其片麻理与围岩一致。根据对岚山头含霓石花岗质片麻岩的年龄测定(U-Pb法年龄测定值为818 Ma; Pb-Pb法年龄测定值为622.7、613.3 Ma)<sup>①</sup>,其形成时代为新元古代。

## 2 花岗质片麻岩的显微特征

含霓石的花岗质片麻岩呈灰白、浅肉红色,粒状变晶结构,片麻状构造。根据样品的显微特征,本研究区的花岗质片麻岩为钾长花岗质片麻岩和二长花岗质片麻岩(图2),浅色矿物主要为钾长石±斜长石+石英,含量75%~95%。钾长石粒状他形—半自形,粒径一般0.25~2 mm,含量为30%~66%,斜长石呈他形—半自形粒状,粒径一般0.25~1.5 mm,含量0~30%;石英他形粒状,粒径一般0.25~1.0 mm,含量25%~37%。暗色矿物主要有角闪石、黑云母、白云母、磁铁矿、榍石、石榴石、褐帘石、绿帘石、磷灰石、霓石及锆石等。角闪石、云母等定向排列形成片麻理,其中样品040508-3、04515-37a中石英、长石等矿物轻微发生糜棱岩化。除样品04515-32的暗色矿物含量达到15%以外,其余样品的暗色

①山东省地质调查局, 1996~1998. 日照幅地质图.

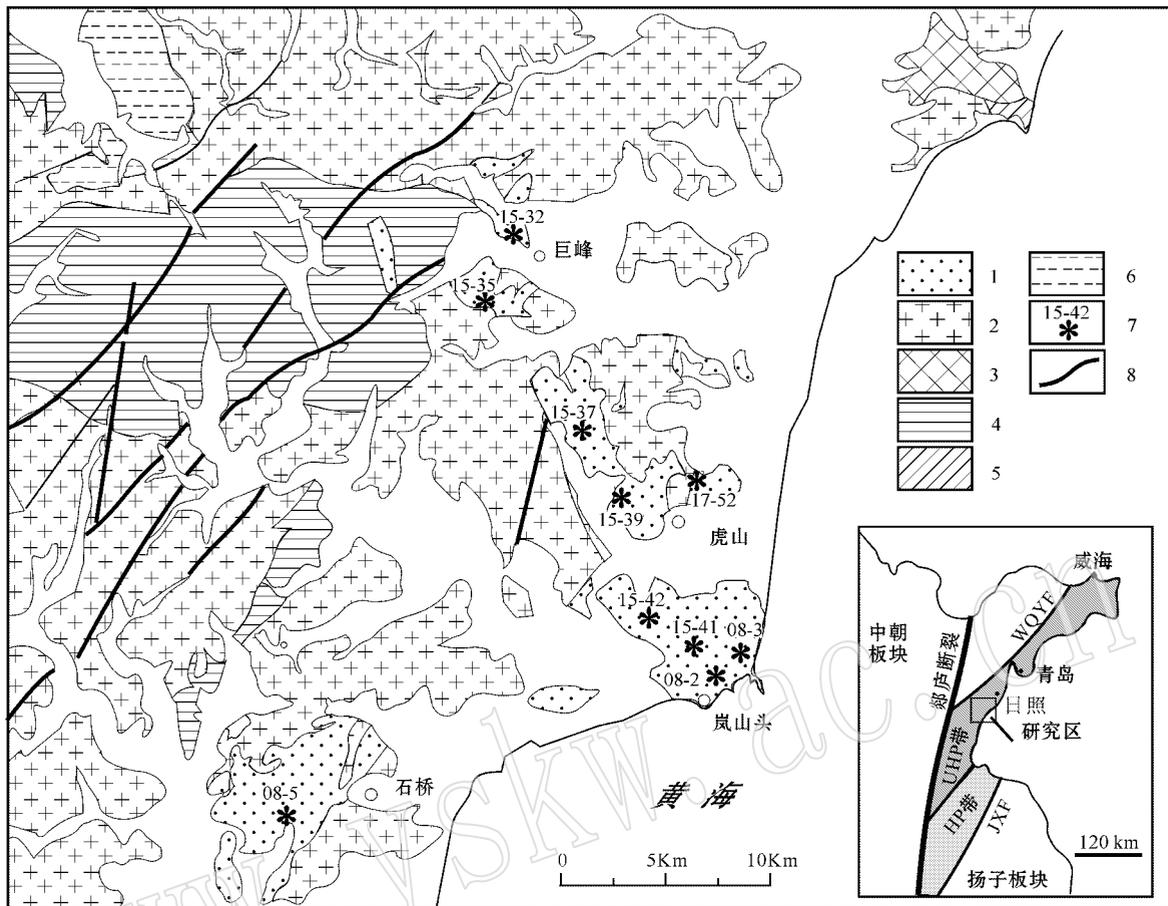


图 1 胶南地区地质简图(据山东省地质调查局<sup>①</sup>修改)及采样位置

Fig. 1 Sketch geological map of Jiaonan region (modified after Geological Survey of Shandong Province<sup>①</sup>), showing sampling sites

1—含霓石花岗质片麻岩 2—新元古代花岗质片麻岩 3—燕山期花岗岩 4—元古代变粒岩 5—中生代沉积岩 6—第四系 7—采样点及样品号 8—断层;WQYF—五莲-青岛-烟台断裂 JXF—嘉山-响水断裂

1—aeirine-bearing granitic gneiss ;2—Neoproterozoic granitic gneiss ;3—Yanshanian granite ;4—Neoproterozoic granulite ;5—Mesozoic sedimentary rock ;6—Quaternary ;7—sampling site and sample serial number ;8—fault ;WQYF—Wulian - Qingdao - Yantai fault ;JXF—Jiashan - Xiangshui fault

矿物含量均小于 10%。根据暗色矿物的含量可将花岗质片麻岩分为含磁铁矿钾长花岗质片麻岩、含石榴(黑云)绿帘钾长花岗质片麻岩、含榴石黑云母钾长花岗质片麻岩、碎斑状含石榴(黑云)二长花岗质片麻岩、角闪黑云二长花岗质片麻岩。除样品 040508-2 中未发现霓石外,其余样品中均存在霓石,其含量小于 1%,部分霓石已退变成云母。无论是钾长花岗质片麻岩还是二长花岗质片麻岩其钾长石的格子双晶都十分发育。岩石中石榴石一般呈残余粒状,常见绿帘石中含有褐帘石包体。在岚山头花岗质片麻岩的锆石中发现了柯石英等超高压变质矿物

(刘福来等,另文发表)。上述特征表明含霓石花岗质片麻岩经历了超高压变质。

### 3 花岗质片麻岩的地球化学特征

#### 3.1 分析方法

全岩化学成分在北京国家地质测试分析中心分析。其中主元素是用 X 荧光光谱法(XRF)完成,所用仪器为日本理学 3080,误差 < 0.5% 微量元素 Zr、Sr、Ba、Zn、Rb、Cl、Y 和 Nb 用 X 荧光光谱法(XRF Rigaku-2100),误差分别为 Ba5%、Cl2% ~ 14%,其

① 山东省地质调查局. 1996~1998. 日照幅地质图.

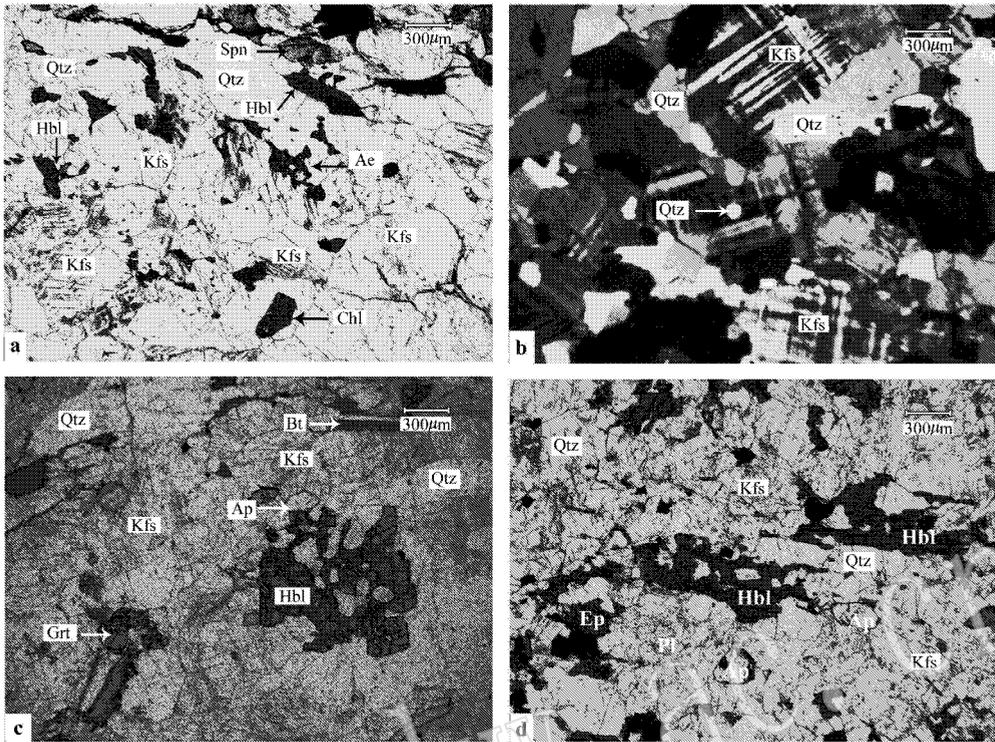


图 2 含霓石花岗质片麻岩的显微结构照片

Fig. 2 Photomicrographs of mineral assemblages in the matrix of aegirine-bearing granitic gneiss

a—含霓石的角闪钾长花岗质片麻岩(单偏光),矿物组成为钾长石(Kfs)+石英(Qtz)+角闪石(Hbl)+榍石(Spn)+霓石(Ae);b—含霓石的钾长花岗质片麻岩(正交偏光),钾长石的格子双晶十分发育;c—含石榴角闪黑云钾长花岗质片麻岩(单偏光),矿物组成为钾长石+石英+角闪石+石榴石(Grt)+黑云母(Bt)+磷灰石(Ap);d—角闪黑云二长花岗质片麻岩(单偏光),矿物组成为钾长石+斜长石(Pl)+石英+角闪石+黑云母+磷灰石

a—aegirine-bearing amphibole potash feldspar granitic gneiss (plainlight), consisting of K-feldspar (Kfs) + quartz (Qtz) + hornblende (Hbl) + sphene (Spn) + aegirine (Ae); b—aegirine-bearing K-feldspar granitic gneiss (crossed nicols), with well-developed crossed twinning of K-feldspar; c—garnet-, hornblende-, biotite- and K-feldspar-bearing granitic gneiss (plainlight), consisting of K-feldspar + quartz + hornblende + garnet (Grt) + biotite (Bt) + apatite (Ap); d—amphibole biotite adamellitic gneiss (plainlight), consisting of K-feldspar + plagioclase (Pl) + quartz + hornblende + biotite + apatite

他元素 < 3% , 稀土元素及 V、Cr、Ni、Co、Cu、Pb、U、Th、Ta 和 Hf 用 TJA-PQ-ExCell 等离子体质谱仪分析, 当元素含量 >  $1 \times 10^{-6}$  时误差为 1% ~ 5% , 当元素含量 <  $1 \times 10^{-6}$  时误差为 5% ~ 10%。

### 3.2 主量元素成分特征

从表 1 可以看出, 花岗质片麻岩的  $\text{SiO}_2$  含量为 68.40% ~ 78.26% , 平均 74.18% ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量 11.34% ~ 15.84% , 平均 12.76% ; 而  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{MgO}$  和  $\text{CaO}$  的含量明显偏低, 其中  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  为 0.69% ~ 2.12% ,  $\text{FeO}$  为 0.18% ~ 1.56% ,  $\text{MgO}$  为 0.05% ~ 1.53% ,  $\text{CaO}$  为 0.19% ~ 1.27% ; 岩石明显富含  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  , 其中  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  含量为 8.32% ~ 10.33% ,  $\text{K}_2\text{O}$  的含量为

3.87% ~ 5.24%。主元素含量与 I、S、M 型花岗岩差别明显, 而与 A 型花岗岩的平均值接近 (Whalen *et al.*, 1987)。 $\text{SiO}_2$  含量除与  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  相关性不明显外, 与其他主量元素的相关性较好, 其中  $\text{SiO}_2$  与  $\text{K}_2\text{O}$  为正相关, 与  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{MgO}$  等主量元素为负相关 (图 3)。全碱含量  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  不随  $\text{SiO}_2$  的变化而变化。

在 An-Ab-Or 分类图解 (图 4) 上, 所有样品的投影点落在花岗岩区域, 在阳离子标准矿物成分  $Q/(Q+Or+Ab+An) - An/(Or+An)$  分类图解 (图 5) 中, 除样品 (04515-32b、04515-42a) 落在正长花岗岩范围外, 其余都落在富含碱性长石的花岗岩区域内, 表明含霓石花岗质片麻岩的原岩为碱性花岗岩。

表 1 胶南岚山头花岗质片麻岩的化学成分

Table 1 Chemical composition of granitic gneiss from Lanshantou in Jiaonan

样品号	040508-2	040508-3	040508-5a	04515-32b	04515-35	04515-37a	04515-39	04515-41a	04515-42a	04517-52
$w_B/\%$										
SiO <sub>2</sub>	75.51	77.28	75.06	72.05	68.40	74.28	75.90	78.26	72.11	72.95
TiO <sub>2</sub>	0.33	0.11	0.28	0.37	0.38	0.26	0.16	0.16	0.30	0.37
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.40	11.72	12.25	12.81	15.84	12.78	13.08	11.34	14.13	12.28
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.05	0.84	1.20	1.76	1.53	1.13	0.69	0.89	1.13	2.12
FeO	0.20	0.18	0.59	1.56	0.68	0.48	0.40	0.41	0.56	0.74
MnO	0.05	0.02	0.09	0.13	0.11	0.04	0.04	0.02	0.07	0.10
MgO	0.22	0.05	0.18	1.53	0.53	0.28	0.14	0.09	0.37	0.55
CaO	0.34	0.19	0.48	0.97	1.27	0.92	0.60	0.28	0.98	0.86
Na <sub>2</sub> O	3.84	4.22	4.54	4.24	6.04	3.78	4.31	3.08	5.17	4.66
K <sub>2</sub> O	5.17	4.36	4.45	4.21	4.29	4.99	4.25	5.24	3.87	3.97
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04	0.01	0.04	0.08	0.10	0.04	0.03	<0.01	0.06	0.04
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0.34	0.40	0.26	0.50	0.32	0.56	0.44	0.28	0.46	0.50
CO <sub>2</sub>	0.26	0.09	0.12	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.12	0.17
Los	0.74	0.44	0.38	0.54	0.43	0.54	0.47	0.38	0.62	0.72
总量	100.49	99.91	99.92	100.84	100.01	100.17	100.61	100.53	99.95	100.03
$w_B/10^{-6}$										
Y	36.00	22.30	56.60	62.70	38.30	36.70	26.20	20.50	20.50	42.80
Hf	9.35	5.85	10.60	10.10	9.86	7.18	5.37	7.90	7.52	14.60
Zr	280.00	127.00	314.00	216.00	330.00	168.00	120.00	230.00	210.00	454.00
Sc	4.54	1.42	3.57	6.17	4.07	2.88	1.72	3.13	3.22	7.67
Cr	3.60	2.41	4.21	47.00	3.91	4.58	3.10	3.84	3.80	17.00
Co	0.62	0.19	0.83	8.21	1.81	1.65	0.64	0.65	1.15	2.79
Ni	0.77	0.69	0.81	23.10	1.43	1.39	0.71	1.27	1.11	6.45
Ga	24.80	18.80	24.90	28.30	20.10	19.50	19.80	15.90	19.80	24.40
Rb	81.40	87.00	82.60	179.00	43.30	117.00	110.00	103.00	74.90	95.10
Sr	25.30	17.30	39.50	31.20	167.00	71.00	63.40	45.40	168.00	72.50
Nb	14.40	11.90	17.80	44.40	11.70	16.30	17.00	9.23	12.50	20.10
Cs	0.28	0.32	0.57	2.05	0.25	0.78	1.05	0.63	0.81	0.85
Ba	258.00	456.00	704.00	112.00	1559.00	536.00	609.00	974.00	1554.00	345.00
Ta	0.74	0.78	0.92	1.16	0.59	1.02	1.16	0.76	0.63	1.01
Pb	23.70	15.60	28.40	34.40	23.60	14.60	11.80	11.20	8.06	33.00
Th	6.26	6.83	8.28	9.52	2.61	11.70	11.10	5.11	6.79	10.90
U	0.60	0.54	0.68	1.17	0.21	1.31	1.37	0.56	1.10	0.64
Ba/Ba*	0.36	0.59	0.85	0.08	4.49	0.46	0.55	1.26	2.18	0.34
La	67.90	29.20	76.50	42.50	71.40	48.20	44.50	13.70	46.30	58.60
Ce	137.00	46.70	160.00	94.80	145.00	103.00	88.60	38.40	92.50	134.00
Pr	14.70	6.73	17.00	10.80	16.30	10.90	9.14	3.63	10.10	14.70
Nd	52.20	23.80	57.20	39.00	58.60	37.70	31.80	14.30	36.30	53.00
Sm	8.16	5.10	11.40	8.52	10.10	6.81	5.57	3.41	6.02	9.83
Eu	1.08	0.35	1.98	0.62	1.43	0.63	0.58	0.55	1.15	1.59
Gd	7.17	4.11	9.55	7.03	7.55	5.93	4.67	2.73	4.79	7.60
Tb	1.13	0.78	1.78	1.57	1.27	1.07	0.78	0.62	0.73	1.29
Dy	6.86	4.70	11.10	10.60	7.58	6.84	4.73	4.14	4.11	7.77
Ho	1.45	0.89	2.19	2.25	1.50	1.42	0.97	0.83	0.83	1.60
Er	4.81	2.87	7.11	7.34	4.79	4.78	3.30	2.64	2.78	5.43
Tm	0.65	0.40	0.97	1.09	0.59	0.69	0.47	0.38	0.36	0.76
Yb	4.39	2.88	6.33	6.95	3.65	4.60	3.12	2.49	2.48	5.12
Lu	0.67	0.44	0.92	1.07	0.52	0.71	0.47	0.40	0.39	0.81
REE	308.17	128.95	364.03	234.14	330.28	233.28	198.70	88.22	208.84	302.10
∑LREE	281.04	111.88	324.08	196.24	302.83	207.24	180.19	73.99	192.37	271.72
∑HREE	27.13	17.07	39.95	37.90	27.45	26.04	18.51	14.23	16.47	30.38
L/H	10.36	6.55	8.11	5.18	11.03	7.96	9.73	5.20	11.68	8.94
Eu/Eu*	0.42	0.23	0.57	0.24	0.48	0.30	0.34	0.53	0.63	0.54

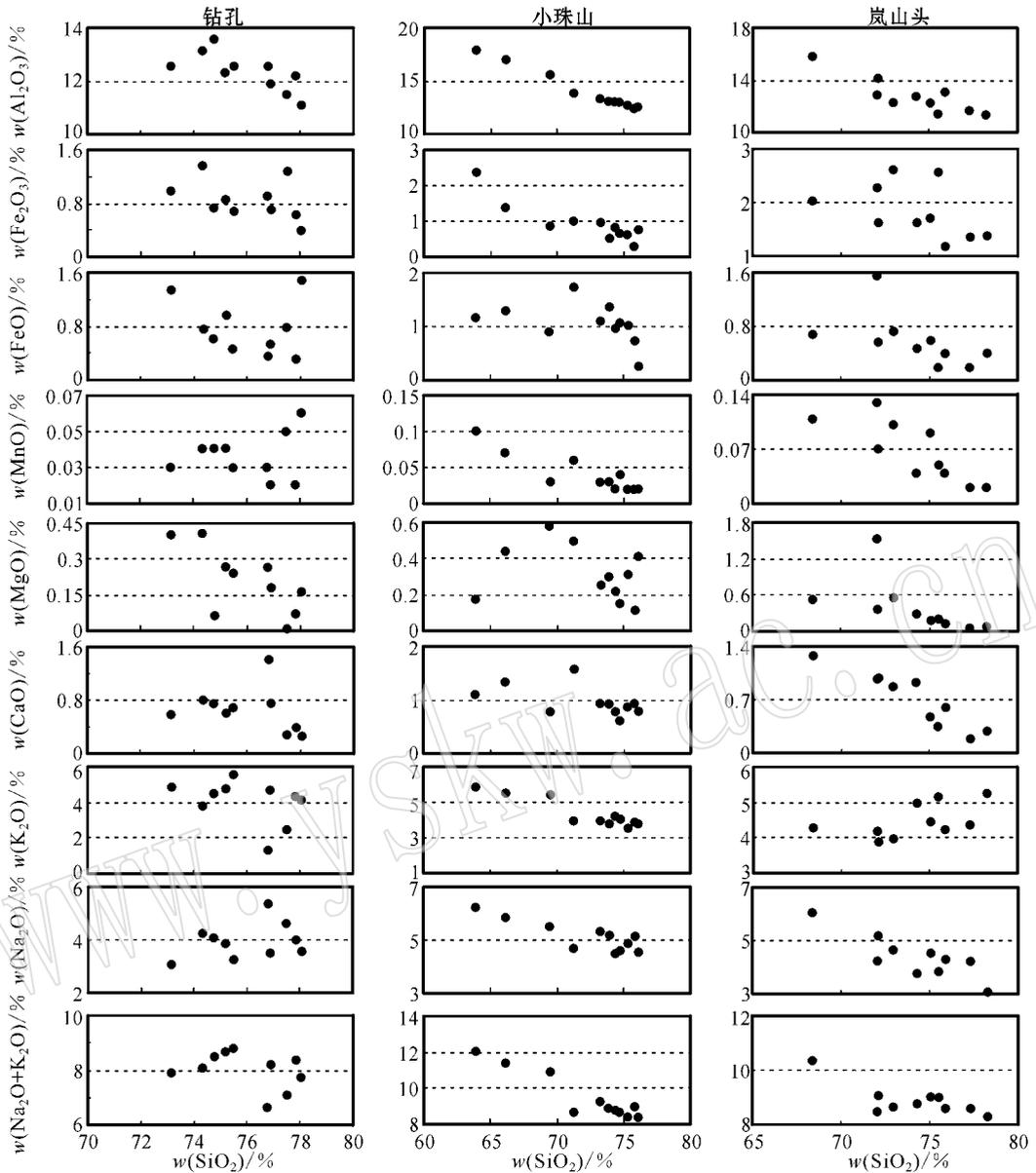


图 3 钻孔、小珠山和岚山头花岗(片麻)岩  $\text{SiO}_2$  和其他主量元素之间的关系图解

Fig. 3 Major elements versus  $\text{SiO}_2$  diagrams for data from Chinese Continental Science Drilling Project, Lanshantou granitic gneisses and Xiaozhushan granites in Qingdao

在 ANK - ACNK 分类图解(图 6)中,所有样品均落在过铝质和准铝质交界附近的准铝质范围内,表明花岗质片麻岩的原岩有可能源于陆壳。

### 3.3 稀土元素及微量元素成分特征

从稀土元素球粒陨石标准化图解中可以明显看出轻稀土元素明显富集,重稀土元素相对平坦(图 7a、7c),具较强的轻、重稀土元素分馏。除样品 0451541a 的轻、重稀土元素含量较低( $\text{LREE} = 88.22 \times 10^{-6}$ ,  $\text{HREE} = 14.23 \times 10^{-6}$ )外,其余样品

$\text{LREE} = 111.88 \times 10^{-6} \sim 324.08 \times 10^{-6}$ ,  $\text{HREE} = 16.47 \times 10^{-6} \sim 39.95 \times 10^{-6}$ , 相应的  $\text{LREE}/\text{HREE} = 5.18 \sim 11.68$  轻、重稀土元素分馏程度( $\text{La}/\text{Yb}_N = 4.13 \sim 12.62$ , 其中轻稀土元素分馏程度( $\text{La}/\text{Sm}_N = 3.14 \sim 5.25$ , 重稀土元素分馏程度( $\text{Gd}/\text{Yb}_N = 0.82 \sim 1.68$ , 具有强烈至中等的负 Eu 异常  $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.23 \sim 0.63$ , 平均值为 0.43。稀土元素配分模式具 A 型花岗岩的典型特征。

在洋脊玄武岩(MORB)标准化蛛网图上所有

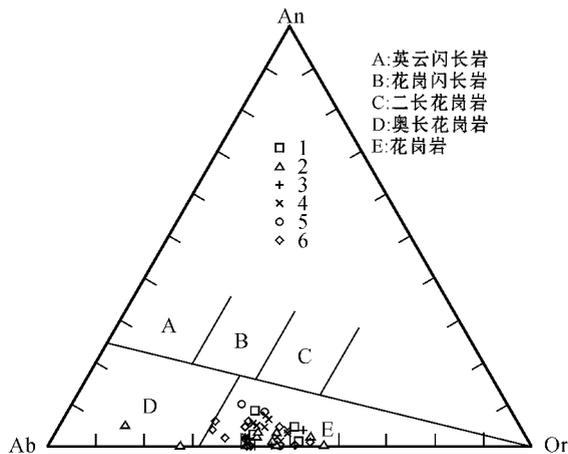


图 4 胶南含霓石的花岗质片麻岩及苏鲁超高压变质带中花岗片麻岩的 An-Ab-Or 分类图解

Fig. 4 An-Ab-Or diagram of granitic gneiss (or granites) from Jiaonan and Sulu HUP metamorphic belt

1—五莲外侧浅变质花岗片麻岩；2—中国大陆科学钻探工程主孔 2 000~3 000 米的部分花岗质片麻岩；3—苏北牛山花岗片麻岩；4—青岛小珠山花岗岩；5—荣成花岗片麻岩；6—岚山头含霓石的花岗片麻岩

1—epimetamorphic orthogneisses on the outer side of Wulian；2—some granitic gneisses from 2 000~3 000 m depth of the main hole of Chinese Continental Science Drilling Project；3—Niushan granitic gneisses in northern Jiangsu；4—Xiaozhushan granite in Qingdao；5—Rongcheng granitic gneisses；6—Lanshantou aegirine-bearing granitic gneisses

样品均表现出强烈富集大离子亲石元素(K、Rb、Ba、Th)的特点(图 7b、7d)。而 Ba 既有正的异常,也有负的异常,高场强元素 Ta、Nb、Zr、Hf、Ti、Y 的特征不尽相同,其中 Ti、Nb 和 Ta 显示明显的负异常,而 Zr、Hf、Y 则不具有此特征。此外,所有样品均显示明显的负 P 异常。

## 4 原岩性质及成因类型

### 4.1 原岩成因类型

上述花岗质片麻岩的地球化学特征表明,本区花岗质片麻岩主元素具有高硅、富钾钠、贫钙、富集大离子亲石元素的特点。岩石样品的  $10\ 000\ Ga/Al = 2.40 \sim 4.11$ ,与全球碱性花岗岩的该值范围相同(洪大卫等,1995)。在  $K_2O - Na_2O$  成因分类图解(张玉泉等,1987)中,所有样品都落在 A 型花岗岩区(图 8a),其稀土元素配分模式图也具有 A 型花岗岩的特征。在王强等(2000)的  $10\ 000\ Ga/Al - Nb$ (图 8b)、 $10\ 000\ Ga/Al - Zr$ (图 8c)分类图解中,大部分样

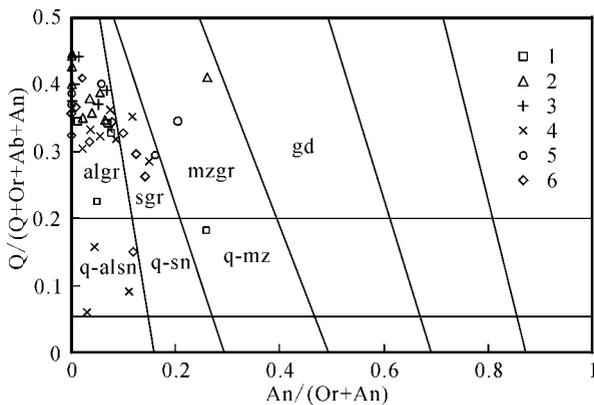


图 5 胶南含霓石花岗质片麻岩的标准矿物  $Q/(Q+Ab+An+Or) - An/(Or+An)$  分类图解(据 Streckeisen 和 Le Maitre, 1979)

Fig. 5 Norm composition of representative samples from Jiaonan aegirine-bearing granitic gneisses in the  $Q/(Q+Ab+An+Or)$  versus  $An/(Or+An)$  diagram (from Streckeisen & Le Maitre, 1979)

algr—碱性花岗岩；sgr—正长花岗岩；mzgr—二长花岗岩；gd—花岗闪长岩；q-alsn—石英碱性长石正长岩；q-sn—石英正长岩；q-mz—石英二长岩；1—五莲外侧浅变质花岗片麻岩；2—中国大陆科学钻探工程主孔 2 000~3 000 m 的部分花岗质片麻岩；3—苏北牛山花岗片麻岩；4—青岛小珠山花岗岩；5—荣成花岗片麻岩；6—岚山头含霓石的花岗片麻岩

algr—alkaline granite；sgr—syenogranite；mzgr—monzogranite；gd—granodiorite；q-alsn—quartz alkaline syenite；q-sn—quartz syenite；q-mz—quartz monzonite；1—epimetamorphic orthogneisses on the outer side of Wulian；2—some granitic gneisses from 2 000~3 000 m depth of the main hole of Chinese Continental Science Drilling Project；3—Xiaozhushan granite in Qingdao；4—Niushan granitic gneisses in northern Jiangsu；5—Lanshantou aegirine-bearing granitic gneisses；6—Rongcheng granitic gneisses

品落在 A 型花岗岩区,在 Eby(1990)的  $SiO_2 - (FeO + Fe_2O_3)/MgO$ (图 8d)成因分类图解中,除样品 04515-32b 落在 I 型和 S 型花岗岩区外,其余样品都落在 A 型花岗岩区。可以肯定,本区花岗质片麻岩的原岩为 A 型花岗岩。

### 4.2 原岩形成的构造环境

对于 A 型花岗岩的成因,洪大卫等(1995)认为是在拉张作用下形成,并将它分为非造山型(AA 型)和后造山型(PA 型)。Whalen 等(1987)和 Eby 等(1990,1992)将 A 型花岗岩分为  $A_1$  型和  $A_2$  型,认为  $A_1$  型花岗岩代表板内隆起断裂体系或裂谷拉张构造环境, $A_2$  型花岗岩代表造山期后的拉张构造环境。而许保良等(1998)认为  $A_1$  花岗岩代表大陆内

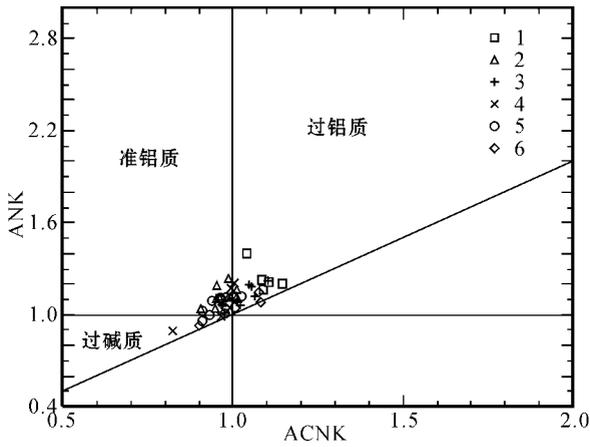


图 6 花岗(片麻)岩的 ANK - ACNK 图解(图例同图 4)  
Fig. 6 ANK versus ACNK diagram of granitic gneisses or granites (legends as for Fig. 4)

部地台、地盾、陆壳抬升、陆内裂谷、板内拉张和热点-地幔柱等构造区的花岗岩类, A<sub>2</sub> 型花岗岩代表造山期后或活动大陆边缘两种构造环境中的高碱质花岗岩类。很明显,这 3 种分类是一致的,只是许保良等(1998)的分类将构造环境阐明得更具体。苏玉平等(2005)将 A 型花岗岩分为碱质 A 型花岗岩和铝质 A 型花岗岩,认为碱质 A 型花岗岩形成晚于铝质 A 型花岗岩。在 Nb - Y - 3 Ga 和 Ce/Nb - Y/Nb 分类图解(图 9a, 9b)中,所有样品都落在 A<sub>2</sub> 区内,表明本区花岗质片麻岩的原岩为活动大陆边缘构造环境下的高碱性花岗岩。在 Nb - Y 和 Rb - (Nb + Y) 判别图解(图 10a, 10b)中,部分样品落入板内花岗岩区,大多数样品落入火山弧花岗岩区。由此可见,本区花岗质片麻岩原岩形成于活动大陆边缘相对宁静的拉

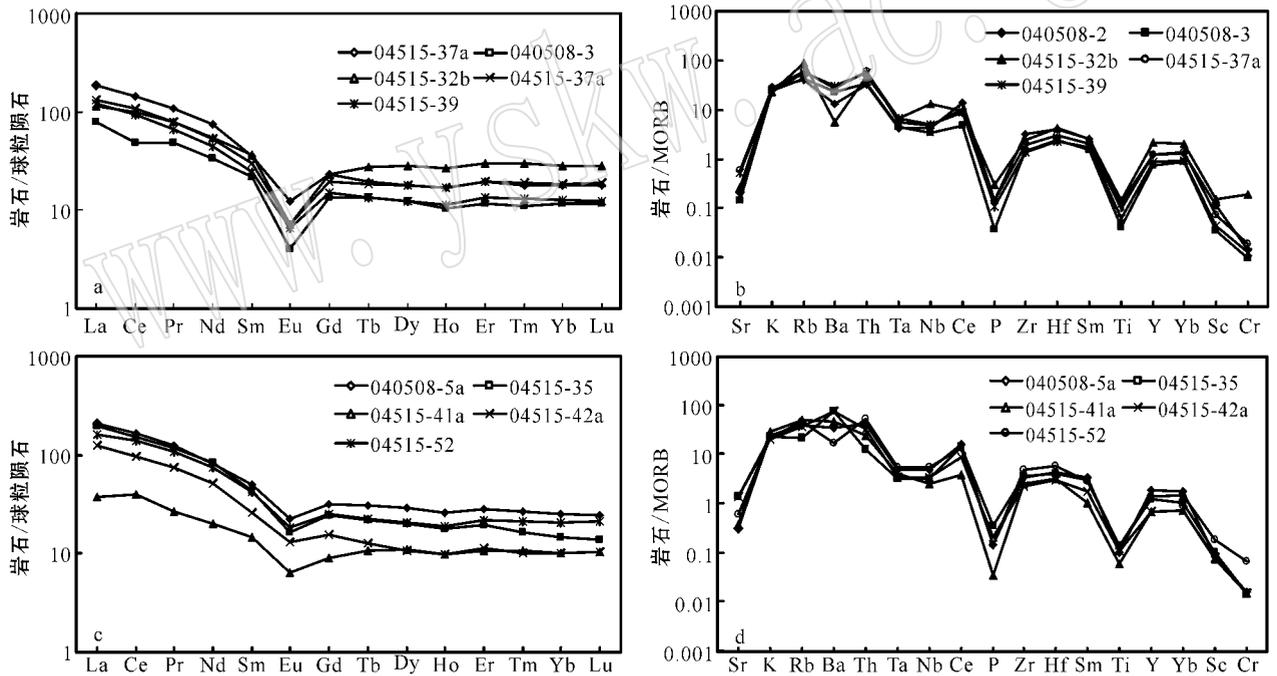


图 7 胶南含霓石花岗片麻岩的稀土元素球粒陨石标准化曲线和微量元素洋脊玄武岩标准化蛛网图

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns and ocean ridge-normalized trace element patterns of Lanshantou aegirine-bearing granitic gneisses

张构造环境,为拉张环境下的陆缘火山弧型花岗岩。

### 4.3 可能的源区性质

目前对 A 型花岗岩的物质来源和成因解释有幔源岩浆分异或部分熔融(Pearce, 1984; 许保良等, 1990; Eby, 1992)壳幔物质混合熔融(Dickin *et al.*, 1991)壳源物质部分熔融和部分熔融残留相的再熔

模式(赵广涛等, 1997)和壳源物质的混染作用(Dickin, 1994)等。从 Ce/Nb - Y/Nb 图解(图 9b)中可以看出,本区花岗质片麻岩均落在平均地壳成分(Batieva, 1976)附近或平均地壳成分与岛弧玄武岩之间,这说明本区陆缘火山弧花岗岩的源岩不可能来自于地幔,只能来自大陆地壳。本区花岗质片麻

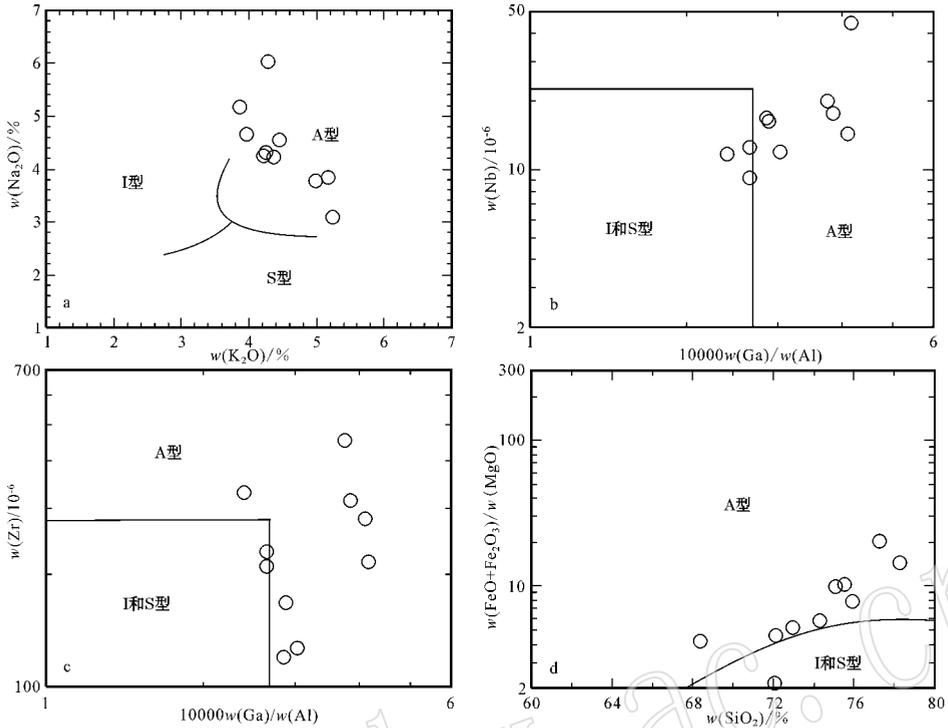


图 8 花岗岩的成因分类图解 (a 据张玉泉等, 1987; b, c 据王强等, 2000; d 据 Eby, 1990)

Fig. 8 Genetic diagram of granite (a after Zhang Yuquan *et al.*, 1987; b and c after Wang Qiang *et al.*, 2000; d—after Eby, 1990)

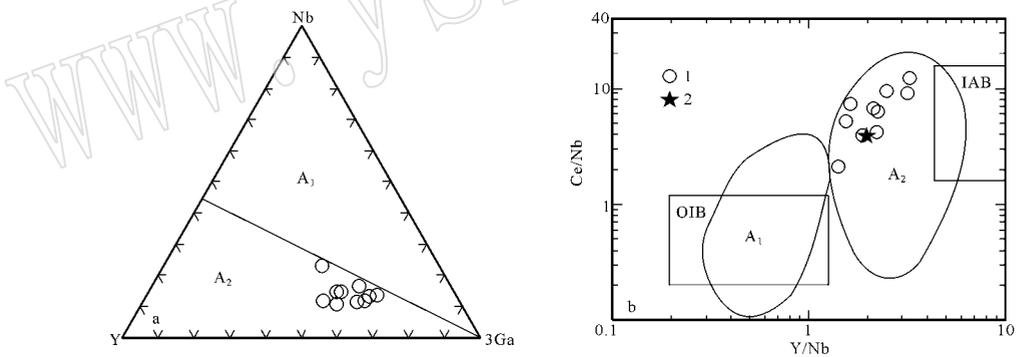


图 9 A 型花岗岩的 Nb - Y - 3Ga、Ce/Nb - Y/Nb 构造环境分类判别图解 (据 Eby, 1992)

Fig. 9 Nb - Y - 3Ce and Ce/Nb versus Y/Nb tectonic discrimination diagram of A-type granites (after Eby, 1992)

IAB—岛弧玄武岩 OIB—洋岛玄武岩 A<sub>1</sub>—非造山型花岗岩 A<sub>2</sub>—后造山型花岗岩 1—岚山头花岗质片麻岩;

2—平均地壳成分 (据 Batavia, 1976)

IAB—*island arc basalt*; OIB—*oceanic island basalt*; A<sub>1</sub>—*anorogenic granite*; A<sub>2</sub>—*post-orogenic granite*; 1—*granitic*

*gneiss of Lanshantou*; 2—*plot of average earth crust* (after Batavia, 1976)

岩中高场强元素 Nb、Ta 及 Ti 呈负异常也显示其可能来自地壳。尽管本次研究未对岚山头花岗质片麻岩做同位素示踪方面的测试工作,但刘建文等 (1997) 对岚山头 A 型花岗质片麻岩锶同位素测试结果表明,其 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 初始比值为 0.729, 明显大于地幔源区岩石的锶初始比值 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr = 0.702 ~ 0.706); 从后文可知, 荣成花岗质片麻岩的原岩也具

有 A 亚型花岗岩特征, 其 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 初始比值介于 0.709 ~ 0.759 之间 (王兰中等, 1994), 平均值为 0.721。根据该初始比值与年龄的关系, 岚山头花岗质片麻岩和荣成花岗质片麻岩的源岩来自于陆壳。现有部分熔融实验表明, 幔源物质的部分熔融或壳幔物质的混合熔融不可能形成富含 SiO<sub>2</sub> 的 A<sub>2</sub> 亚型花岗岩。可以肯定, 岚山头 A 型花岗质片麻岩的源

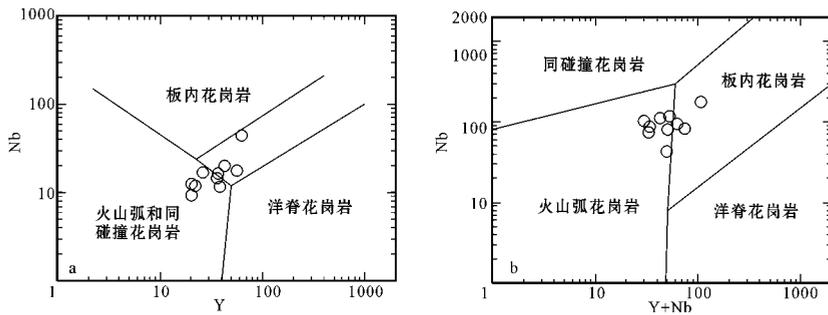


图 10 花岗岩成因的构造环境判别图解(据 Pearce 等, 1984)

Fig. 10 Nb versus Y and Rb versus Nb + Y tectonic discrimination diagram (after Pearce *et al.*, 1984)

岩来自于大陆地壳。由于钾是高度不相容元素,而且许多部分熔融反应都涉及含钾矿物的分解,因此  $K_2O-SiO_2$  哈克图解(图 3)说明了原始物质  $K_2O$  含量对派生的部分熔融产物  $K_2O$  含量的影响,用它能很好地判断部分熔融岩浆的性质(Roberts and Clemens, 1993)。岚山头花岗片麻岩富含  $K_2O$ ,其最可能的岩浆源区物质为中下地壳富钾、贫水的玄武质岩石或玄武质安山岩。越来越多的岩石学研究表明 A 型花岗岩主要来源于中下地壳富钾、贫水的岩石(苏玉平等, 2005; Collins *et al.*, 1982; Landenberger and Collins, 1996)正如薛怀民等(2005)在对五莲地区的花岗质片麻岩的论述一样,富钾的变质玄武岩是本区陆缘火山弧花岗岩最可能的源区。然而与五莲地区不同的是,五莲花岗质片麻岩更富铝,而本区的花岗质片麻岩是准铝质的。造成这一差别的原因可能是源岩的成分不同或形成 A 型花岗岩岩浆的演化阶段不同。苏玉平等(2005)认为碱性 A 型花岗岩比铝质 A 型花岗岩要晚,也就是说,碱质花岗岩可能由铝质 A 型花岗岩演化而来。根据对变质玄武岩的部分熔融实验(Rapp and Watson, 1995),在温度为  $1000 \sim 1025^\circ C$ 、压力为  $0.8 \sim 1.6$  GPa、部分熔融程度为 5% 时,形成高硅富钾的花岗质岩石;部分熔融程度为 5%~10% 时,形成低铝的奥长花岗质岩石,其残余组分为角闪质或石榴角闪质;在温度为  $1050 \sim 1100^\circ C$ 、压力为  $0.8$  GPa 以上、部分熔融程度为 20%~40% 时,形成富铝的花岗闪长质、奥长-英云花岗质、石英闪长质或闪长质岩石。Rapp (1991) 的实验表明,部分熔融过程中,只有在压力小于  $0.8$  GPa 的条件下残留相中的斜长石才是稳定的,而熔体成分为强过铝的,在压力大于  $1.0$  GPa 时石榴石才能发生部分熔融。岚山头花岗片麻岩的原岩高硅富钾钠,强烈贫钙,岩石为准铝质,具强烈到

中等的负 Eu 异常,表明斜长石已发生部分熔融,重稀土元素相对平坦,分馏作用不明显,表明石榴石未发生部分熔融。因此,本区 A 型花岗岩原岩形成的压力应为  $0.8 \sim 1.0$  GPa,部分熔融程度不超过 10%。

#### 4.4 与苏鲁超高压变质带其他花岗质片麻岩的对比

本文选择苏鲁超高压变质带中其他地区的部分花岗质片麻岩、花岗岩与本区碱性花岗质片麻岩进行了地球化学性质对比,它们是五莲外侧浅变质花岗质片麻岩、中国大陆科学钻探工程主孔  $2000 \sim 3000$  m 的第一、二类花岗片麻岩、东海牛山花岗质片麻岩、青岛小珠山花岗岩和荣成花岗质片麻岩。

众多研究表明,苏鲁超高压变质发生于三叠纪。前人有关花岗片麻岩同位素年龄研究结果表明,中国大陆科学钻探工程主孔中的花岗质片麻岩(SHRIMP U-Pb 法,  $663 \sim 750$  Ma, 刘福来等, 2004、2005)东海牛山花岗片麻岩(Rb-Sr 法,  $797.7 \pm 1.5$  Ma, 樊金涛, 2000)五莲外侧浅变质花岗片麻岩(U-Pb 谐和年龄,  $742 \pm 9$  Ma,  $747 \pm 14$  Ma, 周建波等, 2002)荣成花岗片麻岩(锆石 U-Pb 法测定年龄为  $648 \sim 890$  Ma, 王兰中等, 1994)形成于新元古代并经历了三叠纪超高压变质,青岛小珠山花岗片麻岩的 K-Ar 同位素年龄为  $120.17 \pm 1.42$  Ma,  $90.4 \sim 93.87$  Ma (周汝国, 2001),该岩体未经历三叠纪超高压变质。

五莲花岗片麻岩(薛怀民等, 2005)。岩石中不含霓石,其  $SiO_2 = 64.79\% \sim 74.2\%$ ,平均为  $71.13\%$ , MnO、MgO、FeO、 $Fe_2O_3$  等都偏低,岩石全碱含量也较高,  $Na_2O + K_2O$  为  $8.22\% \sim 9.87\%$ ,  $Al_2O_3 = 13.68\% \sim 17.07\%$ ,远高于本区样品值。 $SiO_2$  与其他主要元素由于样品数量少而不显相关性(图 3)。在 An-Ab-Or 分类图解(图 4)中,均落入花岗岩区域,在阳离子标准矿物成分  $Q/(Q + Or + Ab + An) - An/(Or + An)$  分类图解(图 5)中,主要落

入碱长花岗岩区域中。在稀土元素球粒陨石标准化图解中,表现出较强的轻、重稀土元素分馏程度,大都有较强的负  $Eu$  异常。洋脊玄武岩标准化蛛网图显示该花岗片麻岩富集大离子亲石元素( $K$ 、 $Rb$ 、 $Ba$ )、高场强元素( $Ti$ 、 $Zr$ 、 $Ta$ 、 $Nb$ 、 $Hf$ 、 $Y$ )具有不尽相同的特征, $Ti$ 、 $Ta$ 、 $Nb$  呈明显的负异常, $Zr$ 、 $Hf$ 、 $Y$  不具此特征, $Ba$  主要为负异常。

中国大陆科学钻探工程主孔 2 000~3 000 m 第一、二类型的花岗片麻岩(刘福来等,2004,2005), $SiO_2 = 73.15\% \sim 77.85\%$ ,平均 76.00%,普遍偏高; $Al_2O_3 = 11.06\% \sim 13.57\%$ ,平均 12.34%,为准铝质; $MgO$ 、 $MnO$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $FeO$ 、 $CaO$  的含量明显偏低;富含钾、钠, $Na_2O + K_2O = 6.66\% \sim 8.79\%$ ; $SiO_2$  与其他主量元素的相关性不十分明显(图 3)。在  $An - Ab - Or$  分类图解(图 4)中主要落入花岗岩区域,少数落入奥长花岗岩区,在阳离子标准矿物成分  $Q/(Q + Or + Ab + An) - An/(Or + An)$  分类图解(图 5)中落入碱性长石花岗岩、二长花岗岩和石英碱性长石正长岩区域;具较强的轻、重稀土元素分馏程度和较强的负  $Eu$  异常。洋脊玄武岩标准化蛛网图显示该类岩石富集大离子亲石元素( $K$ 、 $Rb$ 、 $Ba$ )、高场强元素( $Ti$ 、 $Zr$ 、 $Ta$ 、 $Nb$ 、 $Hf$ 、 $Y$ )也具有不尽相同的特征, $Ti$ 、 $Ta$ 、 $Nb$  呈明显的负异常, $Zr$ 、 $Hf$ 、 $Y$  不具此特征;有些样品  $Ba$  为正异常,有些样品  $Ba$  为负异常。

牛山花岗片麻岩(樊金涛,2000)。岩石不含霓石, $SiO_2 = 75.22\% \sim 77.5\%$ ,平均 76.49%,偏高; $Al_2O_3 = 10.83\% \sim 12.09\%$ ,平均为 11.33%,为准铝质; $MgO$ 、 $MnO$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $FeO$ 、 $CaO$  的含量明显偏低,富含钾、钠, $Na_2O + K_2O = 7.48\% \sim 8.35\%$ ;在  $An - Ab - Or$  分类图解(图 4)中,其类型均落入花岗岩区域,在阳离子标准矿物成分  $Q/(Q + Or + Ab + An) - An/(Or + An)$  分类图解(图 5)中均落入碱长花岗岩区域中;具强的轻、重稀土元素分馏。

荣成花岗片麻岩(宋明春等,1995)。岩石含霓石,上述主要对比参数都与本区含霓石花岗片麻岩相似,富钾、钠,强烈贫钙,其原岩具 A 型花岗岩的特征。 $SiO_2 = 72.56\% \sim 77.2\%$ ,平均 75.46%,偏高; $Al_2O_3 = 10.49\% \sim 13.55\%$ ,平均为 11.91%,为准铝质; $MgO$ 、 $MnO$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $FeO$ 、 $CaO$  的含量明显偏低,富含钾、钠, $Na_2O + K_2O = 7.73\% \sim 8.79\%$ ;在图 4 中均落入花岗岩区域,在图 5 中均落入碱长花岗岩、正长花岗岩、二长花岗岩区域;具强的轻、重稀土元

素分馏(王兰中等,1994;宋明春等,1995)。

小珠山花岗岩(周汝国,2001)。 $SiO_2 = 63.91\% \sim 76.1\%$ ,平均为 72.2%,为本文所有岩石中最低的; $Al_2O_3 = 12.32\% \sim 17.75\%$ ,平均为 14.0%,为准铝-过铝质; $MgO$ 、 $MnO$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $FeO$ 、 $CaO$  的含量明显偏低,富含钾、钠, $Na_2O + K_2O = 8.35\% \sim 12.06\%$ ; $SiO_2$  与其他主元素具有很好的相关性;在图 4 中均落入花岗岩区域,在图 5 中落入碱长花岗岩、正长花岗岩、石英碱性长石花岗岩区域;具强的轻、重稀土元素分。

元素地球化学对比表明,它们均具有碱性花岗岩的特点,富钾、钠,强烈贫钙。除五莲花岗质片麻岩为过铝质外,其余均为准铝质,轻稀土元素明显富集,重稀土元素相对平坦,具较强的轻、重稀土元素分馏,花岗质片麻岩既有强烈-中等强度的  $Eu$  负异常,又有  $Eu$  正异常,富集大离子亲石元素。其总体特征都十分相似,表明它们的原岩均为 A 型花岗岩。小珠山花岗岩形成于燕山期,未经历苏鲁造山运动的变质过程,表明小珠山花岗岩于苏鲁造山后的拉张环境,为后造山 A 型花岗岩( $A_2$ ),它的形成标志着苏鲁造山运动的结束。岚山头等新元古代形成的 A 型花岗岩为拉张作用下的陆缘火山弧花岗岩,它们在苏鲁超高压变质带中虽然数量较少,但分布区域较广,说明在新元古代苏鲁地体中的花岗质岩石形成于相对统一的大地构造背景,即拉张作用下的陆缘火山弧构造环境。苏鲁地体中广泛分布的花岗片麻岩,说明在新元古代扬子地台北缘陆缘火山活动频繁,火山作用强烈。

最新研究成果表明全球 Rodinia 超大陆裂解事件开始于 720 Ma(陆松年等,2004),其地质标志是 A 型花岗岩与基性岩墙(脉)的产出,而这一特征在柴达木北缘(陆松年,2002)、南秦岭和华南地区(周鼎武等,1998)都有记录。因此扬子地台北缘的拉张环境可能与这一事件有关,苏鲁造山带中的新元古代花岗岩浆和基性岩浆事件可能是 Rodinia 超大陆裂解事件在苏鲁地区的强烈反响。

#### 4.5 A 型花岗质片麻岩与其他类型花岗质片麻岩之间的关系

花岗质片麻岩是苏鲁超高压变质带中主要岩石类型之一,占超高压变质岩石的 70% 以上,不少学者都对其进行过研究(宋明春等,1995;孙景贵等,1997;李永刚等,1999;潘明宝等,2002;刘福来等,2004,2005)。前人的研究成果表明苏鲁超高压变质

带中的花岗质片麻岩主要有两种类型:高钾 I 型花岗质片麻岩和 A 型花岗质片麻岩。高钾 I 型花岗质片麻岩岩石类型有石英闪长质片麻岩、花岗闪长质片麻岩、二长花岗质片麻岩和钾长花岗质片麻岩,占花岗质片麻岩的绝大多数,分布范围从鲁东一直延伸到苏北,构成了苏鲁超高压变质带主体岩性。

根据李永刚等(1999)、孙景贵等(1997)和宋明春等(1995)等对胶东地区花岗质片麻岩的研究,高钾 I 型花岗质片麻岩轻、重稀土分馏程度较强,重稀土相对平坦,明显的 Eu 负异常,富集大离子亲石元素和亏损高场强元素,表明高钾 I 型花岗质片麻岩的原岩在成因上与活动大陆边缘火山弧花岗岩有成因联系(薛怀民等,2006)。Borg 等(1998)认为活动大陆边缘 I 型花岗岩的成因是由于铁镁质下地壳高程度的部分熔融(35%~45%)。

A 型花岗质片麻岩的岩石类型主要有钾长花岗质片麻岩和二长花岗质片麻岩,岩石富含碱性矿物。主要分布在苏鲁超高压变质带的东南部,其围岩一般都为高钾 I 型花岗质片麻岩。本次研究表明, A<sub>2</sub> 亚型花岗质片麻岩的原岩形成于拉张作用下的陆缘火山弧环境,为下地壳变质玄武岩在部分熔融程度不超过 10% 的情况下形成。

由上述高钾 I 型花岗质片麻岩与 A 型花岗质片麻岩的产出关系可以看出,苏鲁超高压变质带中主体岩性-花岗质片麻岩为典型的钙碱性-碱性花岗岩原岩所组成的 I-A 型复合花岗岩体,其主元素和微量元素的地球化学特征与赵广涛等(1997)所描述的青岛崂山中生代 I-A 型花岗岩体类似。众多的同位素年龄资料表明,苏鲁超高压变质带中的 I-A 型复合花岗岩体形成于元古宙,并经历了三叠纪的超高压变质。根据苏鲁超高压变质地体的折返模式(许志琴等,2004),扬子板块巨量物质深俯冲后的快速折返最佳方式是像牙膏一样的“挤出”,而且保持与俯冲态势基本相似的自上而下变质岩石单元次序,可以推测,苏鲁地体中 A 型花岗质片麻岩的原岩在经历三叠纪俯冲前应处在扬子地台北缘的最外侧,向地台内变为以 I 型花岗岩为主。

## 5 结论

(1) 胶南岚山头地区花岗质片麻岩的化学成分表现为 SiO<sub>2</sub> 含量普遍高,平均值为 74.18%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 11.34%~15.84%,平均值为 12.76%; 而

TiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeO、MnO 和 MgO 的含量明显偏低,其中 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 0.69%~2.12%, FeO 为 0.18%~1.56%, MgO 为 0.05%~1.53%; 岩石明显富含 Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O,其中 Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O 的含量为 8.32%~10.33%, K<sub>2</sub>O 的含量为 3.87%~5.24%。岩石富含钾、钠,强烈贫钙,具有典型 A 型花岗岩特点。

(2) 胶南花岗质片麻岩的稀土元素配分模式其轻稀土元素右倾,重稀土元素平坦的特点,轻、重稀土元素分馏较强,负 Eu 异常中等,洋脊玄武岩(MORB)标准化蛛网图上显示出强烈富集大离子亲石元素(K、Rb、Ba、Th)的特点, Ba 显示有正的异常和负的异常,高场强元素 Ta、Nb、Zr、Hf、Ti、Y 的特征不尽相同,其中 Ti、Nb 和 Ta 显示明显的负异常。此外,所有样品均显示明显的负 P 异常。

(3) 胶南花岗片麻岩地球化学特征显示其原岩为 A 型花岗岩中的 A<sub>2</sub> 亚类,指示其形成于拉张作用下的陆缘火山弧构造环境,源岩可能为新元古代下地壳富钾的变质玄武岩部分熔融而成,形成压力为 0.8~1.0 GPa,部分熔融程度不超过 10%。

(4) 苏鲁超高压变质带中许多碱性花岗岩体均具有 A 型花岗岩特点。新元古代 A 型花岗岩特点表明苏鲁地体在新元古代处于相对宁静的拉张环境。苏鲁造山带中的新元古代花岗岩浆和基性岩浆事件可能是 Rodinia 超大陆裂解事件在苏鲁地区的强烈反响。

## References

- Batieva I G. 1976. Petrology of the Alkaline Granitoids in Kola Peninsula [M]. Leningrad: Nanka (in Russian).
- Borg L E and Clyne M A. 1998. The petrogenesis of felsic calcalkaline magmas from the southernmost Cascades, California: origin by partial melting of basaltic lower crust [J]. *J. Petrology*, 39: 1197~1222.
- Collins W J, Beams S D, White A J R, et al. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia [J]. *Mineral. Petrol.*, 80: 189~200.
- Dickin A P. 1994. Nd isotope chemistry of Tertiary igneous from Arran, Scotland: implications for magma evolution and crustal structure [J]. *Geological Magazine*, 131: 329~333.
- Dickin A P, Halliday A N and Bowden P. 1991. A Pb, Sr and Nd isotope study of the basement and Mesozoic ring complexes of the Jospiateau, Nigeria [J]. *Chemical Geology*, 94: 23~32.
- Eby G N. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculation on their petrogenesis [J]. *Lithos*, 26: 115~134.
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenesis and tectonic implications [J]. *Geology*, 20: 641~644.

- Fan Jintao. 2000. Genetic type and age of the protolith of the Niushan granite gneiss from northern Jiangsu and its geologic significance[ J ]. Progress in Precambrian Research, 23(4): 213~220 (in Chinese).
- Fan Jintao. 2001. A-type granite of multiple-stages and their diagenetic tectonic environment in northeast Jiangsu Province[ J ]. Jiangsu Geology, 25(4): 206~214 (in Chinese).
- Hong Dawei, Wang Shiguang, Han Baofu, et al. 1995. Tectonic setting classifications and discrimination criteria for alkaline granites[ J ]. Science in China(B), 25(4): 418~426 (in Chinese).
- Jiang Shijun and Li Meimei. 1995. Geology and geochemistry of the granitic gneisses in Tongbai-Dabie area[ J ]. Hubei Geology, 9(2): 53~64 (in Chinese).
- Landenberger B and Collins W J. 1996. Derivation of A-type granites from a dehydrated charnockitic lower crust: Evidence from the Chaelundi Complex, eastern Australia[ J ]. J. Petrology, 37(1): 145~170.
- Li Yonggang, Guo Jinghui, Zhai Mingguo, et al. 1999. Geochemical differences of basement felsic gneisses in Shandong peninsula and its significance to the boundary between North China plate and Sulu UHP belt[ J ]. Acta Petrologica Sinica, 15(4): 557~563 (in Chinese).
- Ling Wenli, Zhang Hongfei, Gao Shan, et al. 2000. Geochemical constraints on the partial melting of Dabie subducted blocks during UHP process[ J ]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 25(6): 573~578 (in Chinese).
- Liu Fulai, Xu Zhiqin, Katayama Ikuo, et al. 2001. Mineral inclusions in zircons of para- and orthogneiss from pre-pilot drillhole CCSD-PPI, Chinese Continental Scientific Drilling Project[ J ]. Lithos, 59: 199~215.
- Liu Fulai, Xu Zhiqin, Yang Jingsui, et al. 2004. Geochemical characteristics and UHP metamorphism of granitic gneisses in the main drilling hole of Chinese Continental Scientific Drilling Project and its adjacent area[ J ]. Acta Petrologica Sinica, 20(1): 9~26 (in Chinese).
- Liu Fulai, Xu Zhiqin, Yang Jingsui, et al. 2005. Geochemical characteristics and genetic mechanism of orthogneiss and paragneiss in the depth intervals of 2 000~3 000 m from main drill hole of Chinese Continental Scientific Drilling Project[ J ]. Acta Petrologica Sinica, 21(2): 305~324 (in Chinese).
- Liu Jianwen, Zhang Xidao, Luan Yuandian, et al. 1997. Basic characteristics and geological significance of aegirine-bearing alkaline granites in Lan Shanto[ J ]. Geology in Shandong, 13(1): 50~59 (in Chinese).
- Liu Xiaochun, Dong Shuwen, Qian Cunchao, et al. 2001. Gneissic Granite did not Experience Ultrahigh-Pressure Metamorphism from Bixiling, the Dabie Mountains[ J ]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 20(1): 9~26 (in Chinese).
- Lu Songnian, Li Huaikun, Chen Zhihong, et al. 2004. Relationship between neoproterozoic cratons of China and the Rodinia[ J ]. Earth Science Frontiers, 11(2): 515~523 (in Chinese).
- Pan Mingbao, Zhang Qinglong, Chen Huogen, et al. 2002. Lithostratigraphic framework on the southern margin of the Su-Lu orogen[ J ]. Geological Bulletin of China, 21(12): 848~854 (in Chinese).
- Pearce J A. 1984. Trace element discrimination diagram for tectonic interpretation of granitic rocks[ J ]. J. Petrol., 25: 656~682.
- Rapp R P, Watson E B and Miller C F. 1991. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalites[ J ]. Precambrian Research, 94: 619~633.
- Rapp R P and Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8~32 kbar: implication for continental growth and crust-mantle recycling[ J ]. J. Petrol., 36: 891~931.
- Roberts M P and Clemens J D. 1993. The origin of high K calc-alkalic I-type granitoid[ J ]. Geology, 21: 825~828.
- Song Mingchun, Wang Laiming, Wang Lanzhong, et al. 1995. Ludong Rongcheng gneiss suite and its origin[ J ]. Geology in Shandong, 11(2): 32~44 (in Chinese).
- Streckeisen A and Le Maitre R W. 1979. A chemical approximation of the model QAPF classification of the igneous rocks[ J ]. Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen, 136: 169~206.
- Su Yuping and Tang Hongfeng. 2005. Trace Element Geochemistry of A-type granites[ J ]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 24(3): 245~251 (in Chinese).
- Sun Haiting, Wang Rucheng, Xu Shijin, et al. 2002. Mineral chemistry and geochemical characteristics of metagranitoids from the ultrahigh pressure metamorphic belt, east Dabie Mountains and their geological significance[ J ]. Geological Journal of China Universities, 8(1): 25~39 (in Chinese).
- Sun Jinggui and Hu Ke. 1997. Geochemistry and Petrogenesis of the Proterozoic Granitoids in the East Shandong Peninsula, China[ J ]. Acta Petrologica Sinica, 13(3): 439~450 (in Chinese).
- Wang Lanzhong and Wang Laiming. 1994. Basic features of Rong Chen Superunit[ J ]. Geology in Shandong, 10(2): 13~23 (in Chinese).
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua and Xiong Xiaolin. 2000. The Ascertainment of Late-Yanshanian A-type Granite in Tongbai-Dabie Orogenic Belt[ J ]. Acta Petrologica et Mineralogica, 19: 297~306 (in Chinese with English abstract).
- 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.
- Xu Baoliang, Yan Guohan and Zhang Chen. 1998. Petrological subdivision and source material of A2 type granites[ J ]. Earth Science Frontiers, 5(3): 113~124 (in Chinese).
- Xu Shutong, Wu Weiping, Su Wen, et al. 1998. Meta-granitoid from the high-ultrahigh pressure metamorphic belt in the Dabie Mountains and its tectonic significance[ J ]. Acta Petrologica Sinica, 14(1): 42~59 (in Chinese).
- Xu Zhiqin, Zhang Zeming, Liu Fulai, et al. 2004. The structure profile of 0~1200 m in the main borehole, Chinese Continental Scientific Drilling and its preliminary deformation analysis[ J ]. Acta Petrologica Sinica, 20(1): 53~72 (in Chinese).
- Xue H M, Dong S W and Liou X C. 2001. Geochemical characteristics and their genesis of the granitic gneisses from southeastern Dabie mountain[ J ]. Acta Geologica Sinica, 14(2): 175~183.
- Xue Huaimin, Liu Fulai and Xu Zhiqin. 2005. Geochemical characteristics of weakly metamorphosed orthogneisses outside the Wulian boundary fault along the northern margin of the Sulu UHP metamorphic belt and their protolith petrogenesis[ J ]. Geology in China, 32(2): 249~258 (in Chinese).
- Xue Huaimin, Liu Fulai and Meng Fancong. 2006. Major and trace element geochemistry of granitic gneisses from Sulu orogen, eastern Shandong Peninsula: evidence for a Neoproterozoic active continental

- margin in the northern margin of the Yangtze crator [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 22( 7 ): 1 779~1 79X in Chinese ).
- You Zhendong, Su Shanguo, Liang Fenghua, et al. 2004. Petrography and metamorphic deformational history of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the 100~2000 m core of Chinese Continental Scientific Drilling, China [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 20( 1 ): 43~5X in Chinese ).
- Zhai M G, Cong B L, Zhang Q, et al. 1994. The northern Dabieshan terran: A possible Andean-type arc. *Inte [ J ]. Geo. Rev.*, 36 867~883.
- Zhang Yuquan, Xie Yingwen and Tu Guangzhi. 1987. Preliminary studies of the alkali-rich intrusive rocks in the Ailaoshan-Jinshajiang belt and their bearing on rift tectonics [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 3 : 17~2X in Chinese ).
- Zhao Guangtao, Wang Dezi and Cao Qinchen. 1997. The geochemistry and genesis of the Laoshan granitoids, Shandong province [ J ]. *Geological Journal of China Universities*, 3( 1 ): 1~15X in Chinese ).
- Zheng Xiangshen, Jin Chengwei, Zhai Mingguo, et al. 2000. Approach to the source of the gray gneisses in North Dabie Terrain: Sm-Nd isochronage and isotope composition [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 16( 2 ): 194~19X in Chinese ).
- Zhong Zengqiu, Zhang Hongfei, Suo Shutian, et al. 1999. Partial melting in exhumation of ultrahigh pressure metamorphic rocks, Dabieshan Mountains, China [ J ]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 24( 4 ): 393~39X in Chinese ).
- Zhou Dingwu, Dong Yunpeng, Liu Liang, et al. 1998. Sm-Nd dating of basic Dykes from Wudang block and a Discussion of related-question [ J ]. *Acta Geoscientia Sinica*, 19( 1 ): 25~30 ( in Chinese ).
- Zhou Jianbo, Zheng Yongfei and Wu Yuanbao. 2002. Zircon U-Pb ages for Wulian granites in northwest Sulu and their tectonic implications [ J ]. *Chinese Science Bulletin*, 48 : 379~384 ( in Chinese ).
- Zhou Ruguo. 2001. Family classification of granites units and its major characteristics in Xiaozhushan of Qingdao city [ J ]. *Geology in Shandong*, 17( 6 ): 32~3X in Chinese ).
- 学报, 21( 2 ) 305~324.
- 刘建文, 张希道, 栾元滇, 等. 1997. 岚山头一带含霞石碱长花岗岩的基本特征及其地质意义 [ J ]. *山东地质*, 13( 1 ) 50~59.
- 刘晓春, 董树文, 钱存超, 等. 2001. 大别山碧溪岭未经超高压变质的片麻状花岗岩 [ J ]. *矿物岩石地球化学通报*, 20( 1 ) 9~26.
- 陆松年. 2002. 青藏高原北部前寒武纪地质初探 [ M ]. 北京: 地质出版社, 125
- 陆松年, 李怀坤, 陈志宏, 等. 2004. 新元古时期中国古大陆与罗迪尼亚超大陆的关系 [ J ]. *地质前缘*, 11( 2 ) 515~523.
- 潘明宝, 张庆龙, 陈火根, 等. 2002. 苏鲁造山带南缘岩石-地层格架 [ J ]. *地质通报*, 21( 12 ) 848~854.
- 宋明春, 王来明, 王兰中, 等. 1995. 鲁东荣成片麻岩套及其成因 [ J ]. *山东地质*, 11( 2 ) 32~44.
- 苏玉平, 唐红峰. 2005. A型花岗岩的微量元素地球化学 [ J ]. *矿物岩石地球化学通报*, 24( 3 ) 245~251.
- 孙海婷, 王汝成, 徐士进, 等. 2002. 大别山中段超高压变质带中变质花岗岩的矿物化学和地球化学特征 [ J ]. *高校地质学报*, 8( 1 ) 25~39.
- 孙景贵, 胡克. 1997. 胶东东部地区元古宙花岗岩类的地球化学及岩石成因 [ J ]. *岩石学报*, 13( 3 ) 439~450.
- 王兰中, 王来明. 1994. 荣成超单元的基本特征 [ J ]. *山东地质*, 10( 2 ): 13~23.
- 王强, 赵振华, 熊小林. 2000. 桐柏-大别造山带燕山晚期 A型花岗岩的厘定 [ J ]. *岩石矿物学杂志*, 19 297~306.
- 徐树桐, 吴维平, 苏文, 等. 1998. 大别山东部榴辉岩带中的变质花岗岩及其大地构造意义 [ J ]. *岩石学报*, 14( 1 ) 42~59.
- 许保良, 黄福生, 王式洗. 1990. 山海关碱性 A型花岗岩岩石学和地球化学特征及其成因类型 [ A ]. *岩石圈地质科学 [ C ]*. 北京: 北京大学出版社, 158~170.
- 许保良, 阎国翰, 张臣. 1998. A型花岗岩的岩石学亚类及其物质来源 [ J ]. *地质前缘*, 3( 3 ): 113~124.
- 许志琴, 张泽明, 刘福来, 等. 2004. 中国大陆科学钻探主孔 1 200 m 构造柱及变形构造初步解析 [ J ]. *岩石学报*, 20( 1 ) 53~72.
- 薛怀民, 刘福来, 许志琴. 2005. 苏鲁超高压变质带西北缘五莲断裂外侧浅变质花岗岩片麻岩的地球化学特征与原岩成因研究 [ J ]. *中国地质*, 32( 2 ) 249~258.
- 薛怀民, 刘福来, 孟繁聪. 2006. 苏鲁造山带胶东区段花岗岩片麻岩类常量与微量元素地球化学: 扬子克拉通北缘新元古代活动大陆边缘的证据 [ J ]. *岩石学报*, 22( 7 ): 1 779~1 790.
- 张玉泉, 谢应雯, 涂光炽. 1987. 哀牢山-金沙江富碱侵入岩及其与裂谷构造关系初步研究 [ J ]. *岩石学报*, 3 : 17~27.
- 游振东, 苏尚国, 梁凤华, 等. 2004. 中国大陆科学钻探主孔 100~2 000 m超高压变质岩岩相学特征与变质变形史 [ J ]. *岩石学报*, 20( 1 ) 43~52.
- 赵广涛, 王德滋, 曹钦臣. 1997. 崂山花岗岩岩石地球化学与成因 [ J ]. *高校地质学报*, 3( 1 ): 1~15.
- 郑祥身, 金成伟, 翟明国, 等. 1999. 北大别灰色片麻岩的岩石学特征及大地构造背景 [ J ]. *岩石学报*, 15( 3 ) 350~358.
- 钟增球, 张宏飞, 索书田, 等. 1999. 大别超高压变质岩折返过程中的部分熔融作用 [ J ]. *地球科学——中国地质大学学报*, 24( 4 ) 393~399.
- 周鼎武, 董云鹏, 刘良, 等. 1998. 武当地块基性岩墙群的 Sm-Nd 定年及其相关问题讨论 [ J ]. *地球学报*, 19( 1 ) 25~30.
- 周建波, 郑永飞, 吴元保. 2002. 苏鲁造山带西北缘五莲花岗岩中锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [ J ]. *科学通报*, 47( 22 ): 1 745~1 750.
- 周汝国. 2001. 青岛小珠山花岗岩岩石谱系单位划分及其主要特征 [ J ]. *山东地质*, 17( 6 ) 32~38.

## 附中文参考文献

- 樊金涛. 2000. 苏北牛山花岗岩片麻岩原岩成因类型、成岩时代及其地质意义 [ J ]. *前寒武纪研究进展*, 23( 4 ) 213~220.
- 樊金涛. 2001. 苏东北多期 A型花岗岩及其成岩构造环境 [ J ]. *江苏地质*, 25( 4 ) 206~214.
- 洪大卫, 王式洗, 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( 4 ) 418~426.
- 江世俊, 李美美. 1995. 桐柏-大别地区花岗质片麻岩系地质-地球化学特征 [ J ]. *湖北地质*, 9( 2 ) 53~64.
- 李永刚, 郭敬辉, 翟明国, 等. 1999. 胶东地区基底长英质片麻岩的地球化学特征及其构造归属 [ J ]. *岩石学报*, 15( 4 ) 557~563.
- 凌文黎, 张宏飞, 高山, 等. 2000. 大别超高压变质过程中部分熔融作用的地球化学约束 [ J ]. *地球科学——中国地质大学学报*, 25( 6 ) 573~578.
- 刘福来, 许志琴, 杨经绥, 等. 2004. 中国大陆科学钻探工程主孔及周边地区花岗岩片麻岩的地球化学性质和超高压变质作用标志的识别 [ J ]. *岩石学报*, 20( 1 ) 9~26.
- 刘福来, 许志琴, 杨经绥, 等. 2005. 中国大陆科学钻探工程主孔 2 000~3 000 m 正、副片麻岩的地球化学性质及其成因机制 [ J ]. *岩石*