

张琪,周琦忠,孙超,等.苏鲁造山带新沂地区新元古代花岗片麻岩成因及对 Rodinia 超大陆裂解的响应.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(1):140-159,doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220115.

Zhang Qi, Zhou Qizhong, Sun Chao, et al. Genesis of Neoproterozoic Granite Gneiss in Xinyi Area of Sulu Orogenic Belt and Its Response to the Breakup of Rodinia Supercontinent. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(1): 140-159, doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20220115.

苏鲁造山带新沂地区新元古代花岗片麻岩成因 及对 Rodinia 超大陆裂解的响应

张琪¹,周琦忠¹,孙超²,施建斌¹,王博¹,侯琪²,
罗跃¹,冯学知¹,王国强¹

1. 江苏省地质矿产局第五地质大队,江苏 徐州 221004

2. 中国科学技术大学地球和空间科学学院,合肥 230026

摘要:新沂地区花岗片麻岩位于苏鲁造山带的西缘。本文通过新沂地区花岗片麻岩岩相学、岩石地球化学、锆石 U-Pb 同位素年代学等方面的研究,探讨其成因与构造环境,以揭示 Rodinia 超大陆裂解事件在该地区的反响。研究认为:研究区花岗片麻岩属准铝质-弱过铝质 A 型花岗岩,具有高 SiO₂、富碱、贫 CaO、低 Al₂O₃ 质量分数的特征,以及右倾海鸥型稀土元素配分模式,富集 Rb、Zr、Hf 等元素,严重亏损 Sr、Eu、Nb、Ta 等元素,形成年龄为 746.0~742.5 Ma。新沂地区花岗片麻岩是来自下地壳物质为主、少量幔源物质的部分熔融,在岩浆演化过程中经历了以钾长石和斜长石为主的分离结晶,而后经过超高压变质作用最终形成。研究区花岗片麻岩形成于新元古代后碰撞伸展环境,是 Rodinia 超大陆裂解事件在苏鲁造山带新沂地区的最初响应。

关键词:苏鲁造山带;新沂地区;新元古代;花岗片麻岩;岩石成因;Rodinia 超大陆裂解

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220115

中图分类号:P581

文献标志码:A

Genesis of Neoproterozoic Granite Gneiss in Xinyi Area of Sulu Orogenic Belt and Its Response to the Breakup of Rodinia Supercontinent

Zhang Qi¹, Zhou Qizhong¹, Sun Chao², Shi Jianbin¹, Wang Bo¹, Hou Qi², Luo Yue¹,
Feng Xuezhong¹, Wang Guoqiang¹

1. No.5 Geological Team of Jiangsu Geology and Mineral Bureau, Xuzhou 221004, Jiangsu, China

2. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract: The granite gneiss in the Xinyi area is located on the western margin of the Sulu orogenic

收稿日期:2022-04-18

作者简介:张琪(1985-),女,高级工程师,主要从事地质矿产勘查与研究工作,E-mail:dzwzdzqz@foxmail.com

基金项目:江苏省地质勘查基金项目(苏财资环[2021]46号);江苏省地质矿产勘查局科研项目(2021KY09);中国地质调查局项目(DD20190153)

Supported by the Project of Jiangsu Provincial Geological Exploration Fund (Su Cai Zi Huan[2021]No. 46), the Research Project of Jiangsu Geological and Mineral Exploration Bureau (2021KY09) and the Project of China Geological Survey(DD20190153)

belt. This paper discusses its petrogenesis and tectonic environment by examining petrography, rock geochemistry, and zircon U - Pb isotopic chronology of the granite gneiss. It also reveals the repercussions of the breakup event of the Rodinia supercontinent in this area. The findings indicate that the granite gneiss in the study area belongs to the meta-aluminous-weak peraluminous A - type granite, characterized by high SiO_2 content, rich alkali, low CaO and Al_2O_3 contents, and a right-dipping seagull-type rare earth distribution pattern. It is enriched in Rb, Zr, Hf elements, while being severely depleted in Sr, Eu, Nb, Ta elements. The age of the granite gneiss is 746.0 - 742.5 Ma. The granite gneiss in the Xinyi area originated from the partial melting of lower crustal material and a small amount of mantle-derived material. In the process of magma evolution, it underwent the separation and crystallization of potassium feldspar and plagioclase, and eventually formed through ultra-high pressure metamorphism. The granite gneiss in the Xinyi area was formed in a post-collisional extensional environment in the Neoproterozoic, marking the initial response to the Rodinia supercontinent breakup event in study area of the Sulu orogenic belt.

Key words: Sulu orogenic belt; Xinyi area; Neoproterozoic; granite gneiss; petrogenesis; breakup of the Rodinia supercontinent

0 引言

大别—苏鲁造山带位于中国中东部,形成于三叠纪扬子陆块与华北陆块之间的碰撞造山过程,该造山带是世界范围内规模最大、出露最好的超高压变质地体之一,已成为研究陆—陆碰撞造山过程、大陆俯冲带熔流体活动、变质变形的天然实验室^[1-2]。苏鲁造山带通常被认为是大别造山带的延伸,二者被郯庐断裂错断近 500 km,其北部以五莲—烟台断裂为界,南部以嘉山—响水断裂为界,西部则以郯庐断裂带为界^[3]。

苏鲁造山带高压—超高压变质岩主体由变质表壳岩和花岗片麻岩组成,其他岩石类型相对较少且多以透镜体或岩片形式出现在变质表壳岩和花岗片麻岩中^[2,4];在该带中不断发现的柯石英和金刚石等超高压矿物^[5-6],不仅存在于榴辉岩中,在部分花岗质岩石中也有发现^[2]。对于这些花岗片麻岩的研究,以往多集中在大别山地区,近年来苏鲁造山带胶东地区的花岗片麻岩也得到了学者们的关注^[7-8]。由于中国第一口大陆科学钻探就位于苏鲁南部,该地区也引起了中外学者的广泛关注,研究热点主要集中在榴辉岩、榴辉岩相岩石以及中生代中酸性侵入岩的岩石地球化学、年龄、稳定同位素、成因及地壳俯冲与折返过程等方面^[2,9-11]。对于苏鲁造山带内的花岗片麻岩,前人^[4]通常认为其与新元古代 Rodinia 超大陆裂解有关,在苏鲁造山带西缘的新沂地区亦发现该类型岩石,但并未开展相关研究工作。

本文以苏鲁造山带新沂地区的花岗片麻岩为研究对象,通过岩相学、岩石地球化学、锆石 U - Pb 同位素年代学等研究,探讨其原岩成因与构造环境,以期填补新沂地区花岗片麻岩研究的空白,为苏鲁造山带西缘新元古代岩浆演化提供更多的数据支撑,揭示 Rodinia 超大陆裂解事件在该地区的反映。

1 地质背景

研究区位于苏鲁造山带的西缘,地处苏鲁造山带与郯庐断裂带交界地带(图 1)。其基底为新太古代—古元古代的东海变质岩群,以变粒岩—浅粒岩、角闪质岩类和大理岩类为主;其西侧沉积了中生代白垩系巨厚层的紫红色砂页岩、砾岩等陆相碎屑岩。区域构造发育,主要为 NNE 向的郯庐断裂带与派生断裂以及 NW 向断裂。区域岩浆岩可分为元古宙、中生代和新生代 3 个时期,其中:元古宙以超基性岩和中酸性岩变质侵入岩为主,包括榴辉岩和花岗片麻岩;中生代以中酸性侵入岩为主,即桃林中酸性杂岩体,岩石类型包括石英二长岩、二长花岗岩、花岗闪长岩、碱长花岗岩、花岗斑岩和闪长岩等;新生代岩浆活动很弱,仅表现为小规模基性岩浆侵入。

研究区花岗片麻岩主要分布在宋山、踢球山、董湖及双湖等地,均位于郯庐断裂带东侧的苏鲁造山带西缘,岩石类型为花岗片麻岩,共发现宋山花岗片麻岩、董湖花岗片麻岩和小范庄花岗片麻岩等 3 处岩体,其普遍经历了不同程度的韧性剪切变形,糜棱岩化作用强烈。对于花岗片麻岩的形成年代,根据 1:

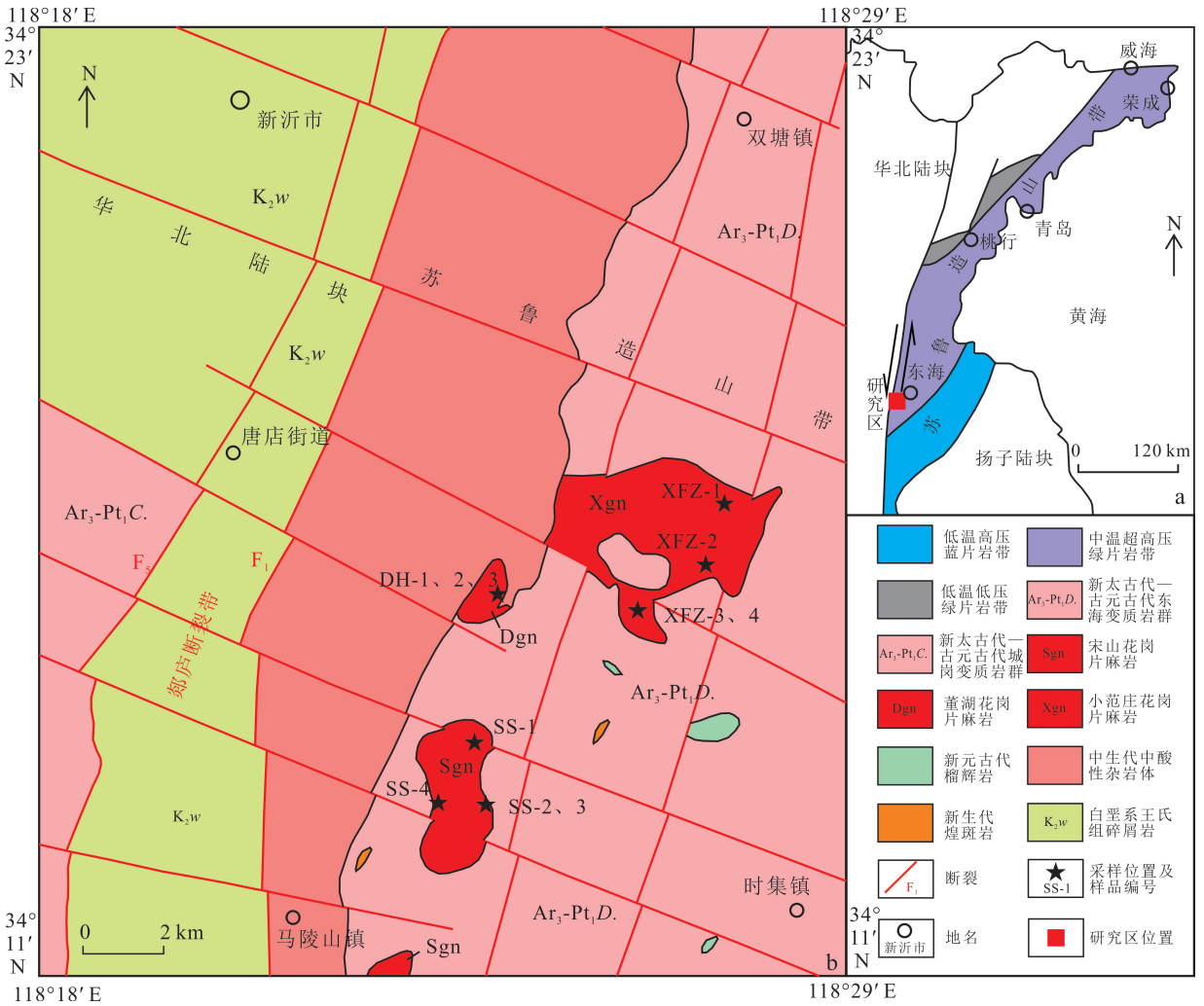


图 1 研究区大地构造位置(a)、区域地质简图及采样位置图(b)

Fig.1 Geotectonic position (a), regional geological map and sampling position map (b) of the study area

50 000区调报告^①, 宋山花岗片麻岩全岩 Rb - Sr 年龄为 683、788 和 852 Ma, 小范庄花岗片麻岩的锆石 U - Pb 年龄为 692 Ma, 总体属于新元古代。

2 岩相学特征

宋山花岗片麻岩主要出露于宋山一带, 呈北东—南西延伸, 岩体侵入于东海变质岩群中, 见榴辉岩包体。岩性主要为黑云角闪花岗质片麻岩, 岩石呈灰红色, 具片麻状构造、鳞片粒状变晶结构(图 2a—c), 粒径 0.4 ~ 1.5 mm, 主要矿物为石英(30% ~ 35%)、钾长石(30% ~ 35%)、斜长石(15% ~ 20%), 次要矿物为角闪石(10%)、黑云母

(5%), 副矿物(2%)主要由不透明暗色矿物、锆石、磷灰石组成。

董湖花岗片麻岩分布在董湖及踢球山一带, 岩体呈岩枝或岩墙状产出, 规模很小, 侵入于东海变质岩群中, 偶见榴辉岩包体。岩性为花岗质片麻岩, 岩石呈灰红色, 具片麻状构造、鳞片粒状变晶结构(图 2d—f), 粒径 0.5 ~ 2.0 mm, 主要矿物为石英(37%)、钾长石(30% ~ 35%)、斜长石(20% ~ 25%), 次要矿物为黑云母(6%), 副矿物(2%)主要由不透明矿物、锆石、磷灰石组成。

小范庄花岗片麻岩主要分布在踢球山及双湖一带, 岩体侵入于东海变质岩群中, 呈突变接触关系。

①郁继华, 黄以超, 厉建华, 等. 郯城县幅(南 1/2)、新沂市幅、王庄镇幅、晓店幅、宿迁市幅 1: 50 000 区域地质调查报告. 徐州: 江苏省地质矿产局第五地质大队, 1995.

岩性为黑云花岗质片麻岩,岩石呈灰黄色,具片麻状构造、鳞片粒状变晶结构(图 2g—i),粒径 0.5~2.0 mm,主要矿物为石英(35%)、钾长石(25%~30%)、斜长石(20%~25%),次要矿物为黑云母(7%)和角闪石(4%),副矿物(1%)主要由不透明暗色矿物、锆石、磷灰石组成。

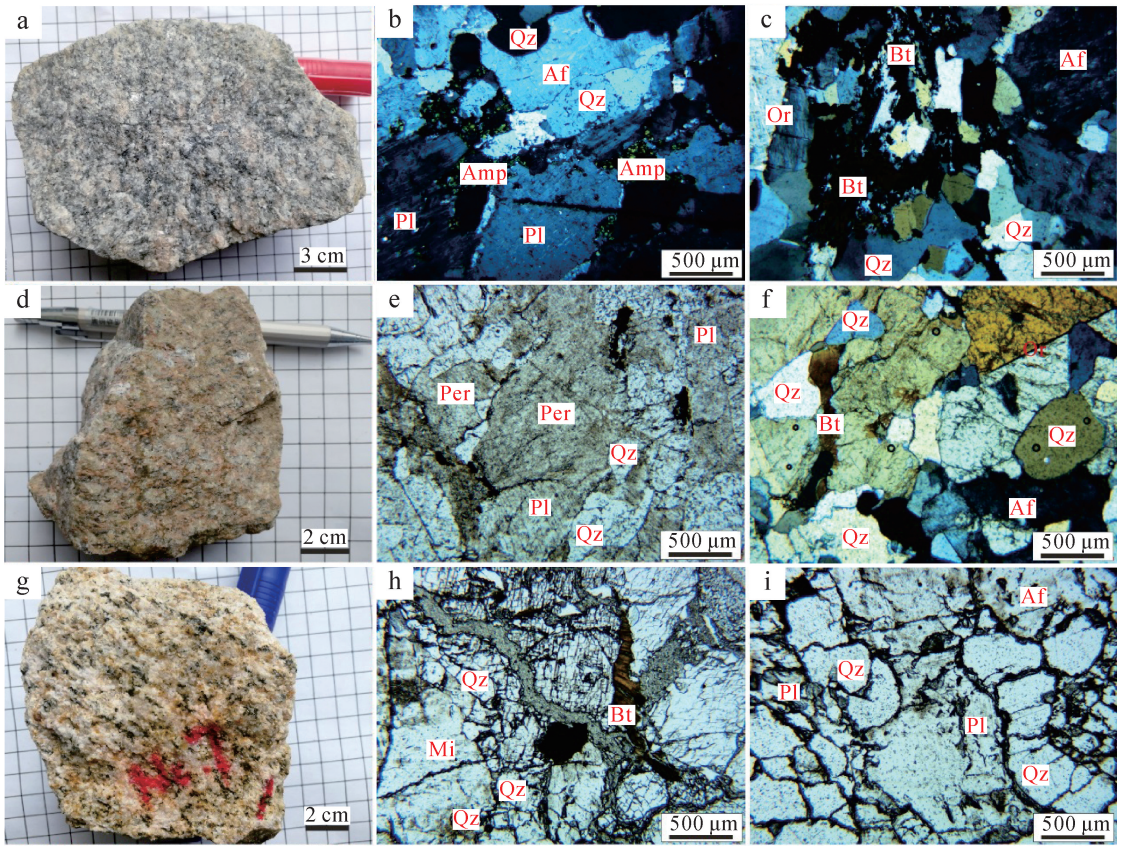
3 样品采集及测试方法

本次样品采集的对象即为上述 3 个岩体,在野外调查时采用捡块法采取新鲜岩石,具体位置见图 1。开展测试项目包括全岩主、微量元素分析和锆石 U-Pb 同位素年龄测定。

全岩主、微量元素分析在广州澳实矿物实验室进行,主量元素测试采用 X 射线荧光光谱仪,分析误差优于±2.5%;微量元素测试采用电感耦合等离子体

质谱(ICP-MS)进行测定,分析误差优于±5%。

锆石单矿物挑选、制靶和阴极发光照相均在河北省廊坊市区域地质调查研究所实验室完成。在锆石年龄测定之前,首先采用破碎、淘洗及镜下人工挑选锆石颗粒,然后将其固定在环氧树脂上制靶,并利用透反射光、反射光以及阴极发光(CL)照相研究其内部结构,选择合适的测点。锆石 U-Pb 同位素分析在中国科学技术大学中国科学院壳幔物质与环境重点实验室完成,利用 Agilent 7700e 四级杆等离子体质谱(LA-ICP-MS)和 M-50 型激光剥蚀系统进行,激光束斑为 32 μm,剥蚀频率为 10 Hz,能量为 10 J/cm²,91500 标准锆石样品作为外标,GJ-1 作为未知样品检测数据质量;锆石 U-Pb 同位素数据处理使用实验室开发的软件 LaDating@Zrn,年龄谱和图绘制采用 Isoplot 3.00 程序^[12]。



a. 宋山花岗片麻岩标本;b,c. 宋山花岗片麻岩镜下照片,正交偏光,鳞片粒状变晶结构;d. 董湖花岗片麻岩标本;e. 董湖花岗片麻岩镜下照片,单偏光,粒状变晶结构;f. 董湖花岗片麻岩镜下照片,正交偏光,鳞片粒状变晶结构;g. 小范庄花岗片麻岩标本;h. 小范庄花岗片麻岩镜下照片,单偏光,鳞片粒状变晶结构;i. 小范庄花岗片麻岩镜下照片,单偏光,鳞片粒状变晶结构。Qz. 石英;Af. 碱性长石;Amp. 角闪石;Pl. 斜长石;Or. 正长石;Bt. 黑云母;Per. 条纹长石;Mi. 微斜长石。

图 2 研究区花岗片麻岩标本和镜下照片

Fig.2 Rock samples and microscope photos of granite gneiss in the study area

4 岩石地球化学特征

苏鲁造山带内的花岗侵入岩普遍遭受过高压—超高压变质作用的改造,在此过程中, Mg、Fe、Ca、Mn、Cr、Ni、V、Co、Sc、Nb、Ta、Y 以及重稀土元素属不活泼元素, Si、Ti 和 Al 亦为不活泼元素, 而 Cs、Rb、K、Ba、U、和 Th 属活泼元素, Na、Sr、Zr、Ce、Hf 则介于两者之间, 属准不活泼元素^[13-14]。为尽可能减少后期变质作用对原岩地球化学的影响, 本文主要基于不活泼元素和准不活泼元素进行讨论。

4.1 原岩属性

1:50 000 区调报告^①将该类型片麻岩归为变质侵入岩, 野外特征显示出明显的侵入关系, 明确其原岩属性为火成岩。

从化学成分角度, 有多种方法可判别其原岩为沉积岩还是火成岩。根据 Shaw(1972)提出的判别函数: $F_D = 10.44 - 0.21w(\text{SiO}_2) - 0.32w(\text{TFe}_2\text{O}_3) - 0.98w(\text{MgO}) + 0.55w(\text{CaO}) + 1.46w(\text{Na}_2\text{O}) + 0.54w(\text{K}_2\text{O})$ 。若 $F_D > 0$, 指示原岩可能是火成岩, 而若 $F_D < 0$, 则原岩为沉积岩^[13,15]。研究区花岗片麻岩 F_D 值为 1.11~2.22, 指示其原岩应为火成岩。Nesbitt 等^[16]提出了变异化学指数: $I_{AC} = 100w(\text{Al}_2\text{O}_3)^2 + w(\text{CaO}) + w(\text{Na}_2\text{O}) + w(\text{K}_2\text{O})$, 未蚀变的花岗岩和花岗闪长岩 I_{AC} 值为 44~55, 而

页岩的 I_{AC} 值则高达 70~75^[17]。区内花岗片麻岩 I_{AC} 值为 56.42~58.67, 略高于花岗岩和花岗闪长岩, 表明其原岩可能为花岗岩或花岗闪长岩。

除了构建经验函数外, 变质岩原岩恢复亦常采用岩石化学图解来进行判别。对于区分沉积岩与中酸性火成岩, $w(\text{TiO}_2) - w(\text{SiO}_2)$ 图解效果更好, 在该图解(图 3a)中, 所有样品均落入火成岩区域。尼格里(Niggli)参数图解亦常作为变质岩原岩恢复的有效手段^[13], 在 $((\text{al} + \text{fm}) - (\text{c} + \text{alk})) - \text{si}$ 图解(图 3b)中, 样品均落入火成岩区域及其附近, 部分样品由于 SiO_2 质量分数较高而出现与砂岩区域重合的现象。总体来说, 研究区花岗片麻岩原岩应为火成岩。

4.2 主量元素特征

研究区花岗片麻岩各样品间主量元素质量分数变化很小(表 1)。 $w(\text{SiO}_2)$ 为 74.40%~77.43%, 平均为 75.65%; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 11.30%~12.40%, 平均为 11.78%; 全碱质量分数为 7.97%~8.93%, 平均为 8.37%, $w(\text{Na}_2\text{O})/w(\text{K}_2\text{O})$ 普遍小于 1; $w(\text{TFeO})$ 为 1.70%~3.19%, 平均为 2.44%; $w(\text{CaO})$ 为 0.07%~0.60%, 平均为 0.36%; $w(\text{MgO})$ 为 0.01%~0.09%, 平均为 0.05%; $w(\text{TiO}_2)$ 为 0.05%~0.21%, 平均为 0.14%。总体具有高 SiO_2 、富碱、贫 CaO 与 MgO、低 Al_2O_3 质量分数的特征, 属硅酸过饱和岩石。

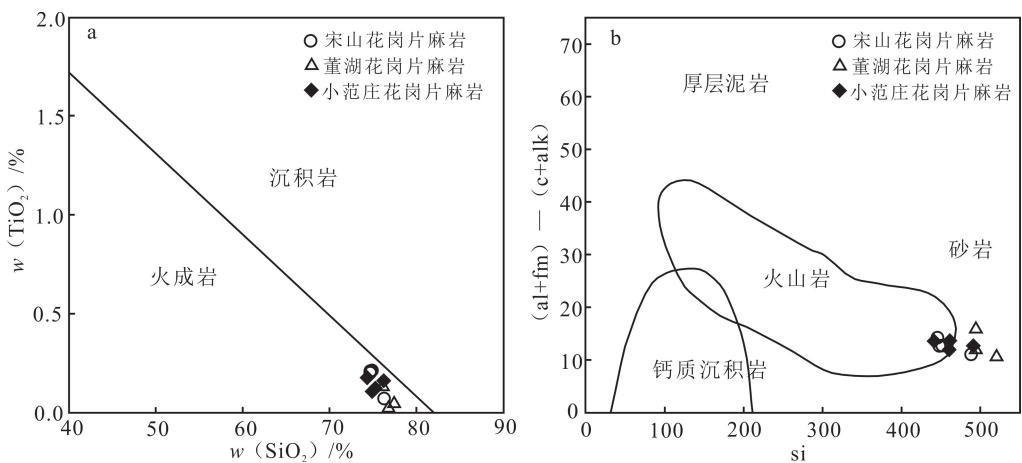


图 3 研究区花岗片麻岩 $w(\text{TiO}_2) - w(\text{SiO}_2)$ (a) 和 $((\text{al} + \text{fm}) - (\text{c} + \text{alk})) - \text{si}$ (b) 判别图解

Fig.3 $w(\text{TiO}_2) - w(\text{SiO}_2)$ (a) and $((\text{al} + \text{fm}) - (\text{c} + \text{alk})) - \text{si}$ (b) diagrams of granite gneiss in the study area

①郁继华, 黄以超, 厉建华, 等. 郯城县幅(南 1/2)、新沂市幅、王庄镇幅、晓店幅、宿迁市幅 1:50 000 区域地质调查报告. 徐州: 江苏省地质矿产局第五地质大队, 1995.

表 1 研究区花岗片麻岩主量、微量元素分析数据表

Table 1 Main and trace element analysis data of granite gneiss in the study area

岩体	样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量	总和
宋山花岗片麻岩	SS-1	76.31	0.07	11.58	0.33	1.87	0.03	0.01	0.24	4.07	4.30	0.01	0.21	99.03
	SS-2	74.71	0.20	11.64	0.41	2.34	0.08	0.08	0.47	3.82	4.70	0.01	0.41	98.87
	SS-3	74.59	0.21	11.54	0.48	2.71	0.05	0.05	0.60	3.87	4.38	0.01	0.40	98.89
	SS-4	74.78	0.21	11.90	0.41	2.30	0.08	0.07	0.54	3.93	4.55	0.01	0.46	99.24
董湖花岗片麻岩	DH-1	76.13	0.14	11.30	0.40	2.24	0.05	0.05	0.12	3.46	4.67	0.01	0.32	98.89
	DH-2	77.43	0.05	11.58	0.26	1.45	0.01	0.01	0.07	4.05	4.13	0.01	0.37	99.41
	DH-3	76.87	0.05	11.91	0.30	1.72	0.01	0.01	0.10	4.30	3.99	0.01	0.27	99.54
小范庄花岗片麻岩	XFZ-1	75.13	0.11	12.30	0.33	1.86	0.04	0.02	0.44	3.81	4.72	0.01	0.21	98.98
	XFZ-2	76.37	0.16	11.42	0.35	2.00	0.03	0.04	0.42	3.77	4.20	0.01	0.23	99.00
	XFZ-3	74.40	0.18	12.40	0.38	2.14	0.05	0.09	0.47	3.25	5.68	0.03	0.35	99.42
	XFZ-4	75.39	0.12	12.05	0.38	2.16	0.04	0.03	0.46	3.63	4.77	0.01	0.08	99.13
岩体	样号	TFeO	全碱	A/NK	A/CNK	F _D	I _{AC}	al	fm	c	alk	si	R ₁	R ₂
宋山花岗片麻岩	SS-1	2.20	8.37	1.02	0.98	2.02	57.36	43.67	11.88	1.65	42.80	488.36	2 600	256
	SS-2	2.75	8.52	1.02	0.95	2.07	56.42	41.52	14.86	3.05	40.57	452.26	2 478	287
	SS-3	3.19	8.25	1.04	0.95	1.94	56.60	40.65	16.38	3.84	39.13	445.86	2 515	298
	SS-4	2.71	8.48	1.05	0.96	2.20	56.88	41.98	14.38	3.46	40.18	447.62	2 472	298
董湖花岗片麻岩	DH-1	2.64	8.13	1.05	1.03	1.11	57.80	43.21	14.85	0.83	41.10	494.06	2 713	240
	DH-2	1.70	8.18	1.04	1.03	1.75	58.40	45.85	9.57	0.50	44.08	520.23	2 731	237
	DH-3	2.02	8.29	1.05	1.03	2.06	58.67	45.19	10.89	0.69	43.23	494.97	2 622	247
小范庄花岗片麻岩	XFZ-1	2.19	8.53	1.08	1.01	2.22	57.83	44.50	11.45	2.89	41.16	461.24	2 516	293
	XFZ-2	2.35	7.97	1.06	0.99	1.53	57.65	43.32	13.00	2.90	40.78	491.66	2 731	274
	XFZ-3	2.52	8.93	1.08	1.00	1.90	56.88	43.40	13.38	2.99	40.23	441.90	2 422	301
	XFZ-4	2.55	8.40	1.08	1.01	1.80	57.63	43.48	13.33	3.02	40.18	461.62	2 568	290
岩体	样号	Ba	Rb	Sr	Nb	Ta	Zr	Hf	Pb	Th	U	La	Ce	Pr
宋山花岗片麻岩	SS-1	42.80	125.00	16.80	13.80	1.00	665.00	21.30	33.00	22.80	2.10	50.10	118.50	14.65
	SS-2	121.00	94.10	24.00	11.70	0.40	568.00	11.50	83.00	10.95	0.96	127.00	245.00	26.80
	SS-3	138.50	94.80	22.80	12.20	0.60	652.00	12.70	9.00	9.57	0.97	107.50	208.00	23.30
	SS-4	146.00	87.70	32.00	9.60	0.30	471.00	9.10	20.00	8.98	0.88	104.00	202.00	22.50
董湖花岗片麻岩	DH-1	386.00	146.50	29.00	16.30	1.30	445.00	12.90	70.00	14.45	1.58	39.90	111.50	9.14
	DH-2	34.20	156.50	13.70	5.50	0.30	271.00	10.20	28.00	9.81	1.06	8.30	23.40	2.41
	DH-3	38.00	154.50	14.90	8.50	0.30	209.00	7.70	19.00	9.00	1.45	5.90	10.50	1.63
小范庄花岗片麻岩	XFZ-1	592.00	107.00	15.30	11.40	0.80	311.00	10.10	41.00	10.35	1.17	22.70	122.00	5.67
	XFZ-2	456.00	91.30	49.40	13.40	1.20	417.00	11.60	11.00	15.85	1.20	27.20	92.30	7.96
	XFZ-3	646.00	132.00	62.20	15.90	1.10	360.00	10.90	13.00	6.80	0.92	12.10	68.80	3.94
	XFZ-4	618.00	109.00	15.20	12.90	0.90	360.00	11.30	16.00	11.40	1.32	24.30	60.70	6.33
岩体	样号	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE
宋山花岗片麻岩	SS-1	56.10	13.85	0.33	12.95	2.06	12.25	2.63	7.44	1.14	7.53	1.19	63.00	300.72
	SS-2	94.70	15.25	0.51	11.10	1.63	8.69	1.69	4.33	0.67	4.44	0.79	42.50	542.60
	SS-3	84.10	14.75	0.44	11.45	1.74	9.53	1.90	5.05	0.77	4.92	0.85	43.80	474.30
	SS-4	80.80	14.10	0.48	11.50	1.68	9.35	1.87	5.15	0.77	5.21	0.88	46.50	460.29

续表 1

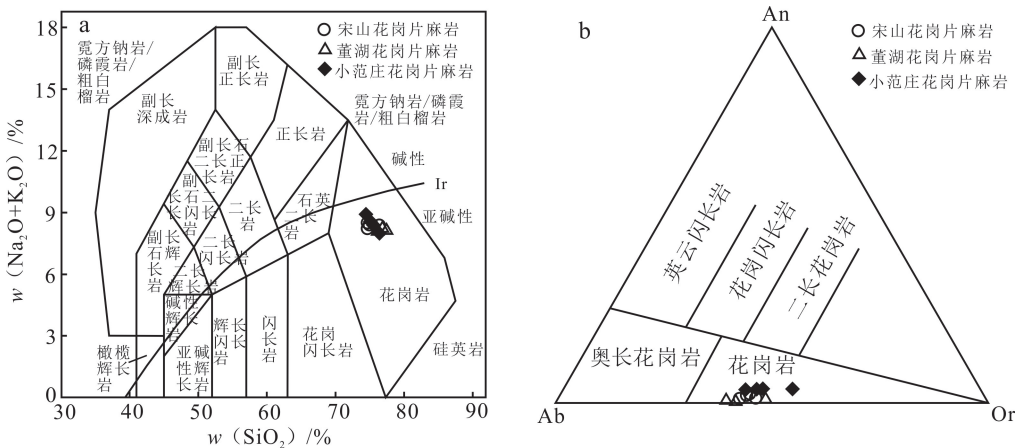
岩体	样号	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE
董湖花岗片麻岩	DH-1	32.40	6.48	0.71	6.06	1.02	6.57	1.45	4.31	0.73	4.79	0.74	35.10	225.80
	DH-2	9.60	3.16	0.19	4.00	0.81	5.73	1.31	3.89	0.63	4.31	0.66	35.40	68.40
	DH-3	6.20	1.57	0.13	1.65	0.34	2.30	0.53	1.70	0.29	2.03	0.34	14.10	35.11
小范庄花岗片麻岩	XFZ-1	22.70	5.56	0.36	5.99	1.11	7.45	1.56	4.43	0.70	4.51	0.66	39.90	205.40
	XFZ-2	30.90	8.20	0.66	8.53	1.54	10.20	2.15	6.29	0.95	5.93	0.93	53.50	203.74
	XFZ-3	16.60	5.25	0.42	5.97	1.23	8.19	1.85	5.44	0.86	5.52	0.82	48.10	136.99
	XFZ-4	25.10	6.41	0.42	7.14	1.28	8.26	1.80	5.16	0.77	4.77	0.69	44.00	153.13

岩体	样号	LREE	HREE	LREE/HREE	(La/Yb) _N	δEu	Nb/Ta	Rb/Sr	Rb/Ba	Ce/Yb	Hf/Ta
宋山花岗片麻岩	SS-1	253.53	47.19	5.37	4.77	0.08	13.80	7.44	2.92	57.52	21.30
	SS-2	509.26	33.34	15.27	20.52	0.12	29.25	3.92	0.78	150.31	28.75
	SS-3	438.09	36.21	12.10	15.67	0.10	20.33	4.16	0.68	119.54	21.17
	SS-4	423.88	36.41	11.64	14.32	0.12	32.00	2.74	0.60	120.24	30.33
董湖花岗片麻岩	DH-1	200.13	25.67	7.80	5.98	0.35	12.54	5.05	0.38	109.31	9.92
	DH-2	47.06	21.34	2.21	1.38	0.16	18.33	11.42	4.58	28.89	34.00
	DH-3	25.93	9.18	2.82	2.08	0.25	28.33	10.37	4.07	30.88	25.67
小范庄花岗片麻岩	XFZ-1	178.99	26.41	6.78	3.61	0.19	14.25	6.99	0.18	109.91	12.63
	XFZ-2	167.22	36.52	4.58	3.29	0.24	11.17	1.85	0.20	59.94	9.67
	XFZ-3	107.11	29.88	3.58	1.57	0.23	14.45	2.12	0.20	55.93	9.91
	XFZ-4	123.26	29.87	4.13	3.65	0.19	14.33	7.17	0.18	47.42	12.56

注:主量元素质量分数单位为%;微量元素和稀土元素质量分数单位为 10⁻⁶。

侵入岩 TAS 分类图解(图 4a)、CIPW 标准矿物 An-Ab-Or 分类图解(图 4b)中,研究区花岗片麻岩原岩的岩石类型均落入花岗岩区域,表明其原岩应为花岗岩,经区域变质作用而形成花岗片麻岩。

宋山片麻岩铝饱和指数 A/CNK 值为 0.95~0.98,A/NK 值为 1.02~1.05,属于准铝质岩类;董湖花岗片麻岩和小范庄花岗片麻岩大多属于弱过铝质岩类(图 5a)。在 w(K₂O)-w(SiO₂)图解(图 5b)



Ir. 碱性岩与亚碱性岩界线。An. 钙长石;Ab. 钠长石;Or. 正长石。

图 4 研究区花岗片麻岩 TAS(a)和 CIPW 标准矿物 An-Ab-Or (b)分类图解

Fig.4 TAS (a) and CIPW standard mineral An-Ab-Or (b) diagrams of granite gneiss in the study area

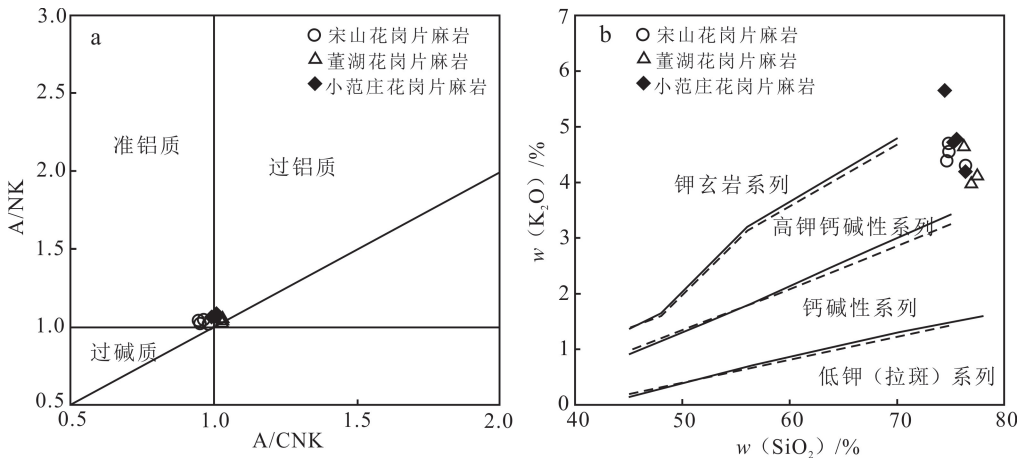


图 5 研究区花岗岩片麻岩 A/NK - A/CNK(a)和 w(K₂O)-w(SiO₂)(b)图解

Fig.5 A/NK - A/CNK (a) and w(K₂O) - w(SiO₂) (b) diagrams of granite gneiss in the study area

中,所有样品几乎均落入了高钾钙碱性系列区域,属高钾钙碱性岩。由于本区花岗岩片麻岩具有贫 MgO 的特征,导致 FeO/(FeO+MgO)值接近于 1,均属铁质花岗岩。

4.3 微量元素特征

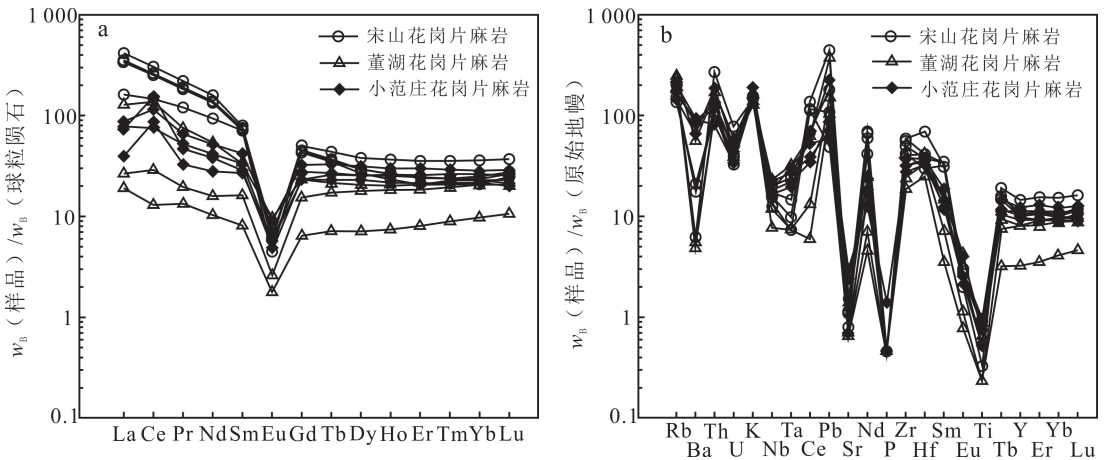
研究区花岗岩片麻岩的 $w(\Sigma\text{REE})$ 为 $(35.11 \sim 542.60) \times 10^{-6}$,其中宋山花岗岩片麻岩较高、董湖花岗岩片麻岩较低; $(\text{La}/\text{Yb})_N = 1.38 \sim 20.52$,其中宋山花岗岩片麻岩较高、轻重稀土分异较明显,董湖花岗岩片麻岩和小范庄花岗岩片麻岩较低、轻重稀土分异不甚明显(表 1)。在稀土元素配分模式图(图 6a)中,可以清晰显示不同岩体间稀土总量和分量的相对质量分数,宋山花岗岩片麻岩位于上方,董湖花岗岩片麻岩位

于下方,小范庄花岗岩片麻岩位于中间部位;总体均具有相似的配分模式,即轻稀土元素略富集、重稀土元素略亏损的右倾海鸥型缓倾斜曲线,均具有显著的 Eu 负异常,可能与斜长石的分离结晶有关。

在微量元素蛛网图(图 6b)中,研究区花岗岩片麻岩均具有相似的特征,大离子亲石元素 Rb、K、Pb 明显富集, Ba、Sr、Eu 严重亏损;高场强元素 Zr、Hf、Th 和 HREE 较为富集, Nb、Ta、Ce、Ti 严重亏损。

4.4 锆石 U - Pb 同位素年龄

从研究区花岗岩片麻岩中挑选的锆石具有相似的特征,多为浅灰色,半自形—自形,长柱状—短柱状,长轴为 $130 \sim 270 \mu\text{m}$,短轴为 $70 \sim 130 \mu\text{m}$,长宽比为 $2 : 1$ (图 7)。锆石核部可见较为清晰的振荡环带,



球粒陨石数据据文献[18];原始地幔数据据文献[19]。

图 6 研究区花岗岩片麻岩的稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig.6 Chodrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantel normalized spidergrams (b) of granite gneiss in the study area

部分颗粒可见后期增生的锆石将核部包裹, Th/U 值为 0.46~1.44(表 2), 指示锆石核部为岩浆成因^[20]。在谐和图上, 宋山花岗片麻岩获加权平均年龄为(742.5±9.4)Ma (MSWD=1.4, n=23)(图 8), 小

范庄花岗片麻岩加权平均年龄为(746.0±8.3)Ma (MSWD=1.4, n=22)(图 9)。这表明, 研究区花岗片麻岩的原岩形成于新元古代, 之后经过变质作用形成花岗片麻岩。

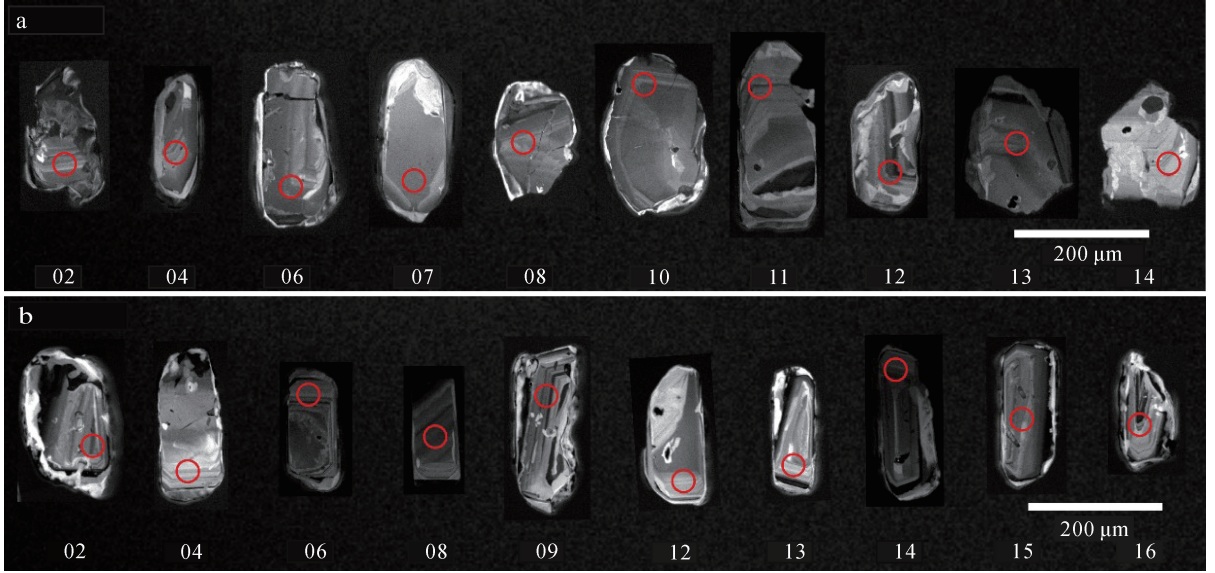


图 7 宋山花岗片麻岩(a)和小范庄花岗片麻岩(b)代表性锆石 CL 图像

Fig.7 Zircon cathodoluminescence images of Songshan granite gneiss (a) and Xiaofanzhuang granite gneiss (b)

表 2 研究区花岗片麻岩中的锆石 U-Pb 同位素分析数据

Table 2 Zircon U-Pb isotopic for granite gneiss in study area

测点	$\omega_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma					谐和度	
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		1σ
SS-01	182.2	177.1	1.03	0.068 5	0.003 9	1.146 0	0.065 1	0.121 4	0.002 8	882	120	775	31	739	16	0.95
SS-02	42.6	55.7	0.77	0.064 8	0.008 4	1.098 5	0.159 8	0.123 0	0.004 0	767	279	753	77	748	23	0.99
SS-03	38.4	46.1	0.83	0.068 3	0.004 9	1.137 6	0.081 1	0.120 9	0.003 1	877	142	771	39	735	18	0.95
SS-04	64.3	87.8	0.73	0.062 0	0.007 6	1.100 0	0.151 7	0.128 7	0.004 1	674	256	753	73	780	23	1.04
SS-05	45.6	48.7	0.94	0.066 6	0.004 4	1.140 6	0.078 4	0.124 3	0.003 3	824	131	773	37	755	19	0.98
SS-06	142.1	150.6	0.94	0.065 1	0.003 8	1.111 7	0.065 5	0.123 8	0.002 8	779	125	759	31	752	16	0.99
SS-07	126.0	158.6	0.79	0.066 3	0.004 1	1.077 0	0.066 3	0.117 8	0.002 7	817	126	742	32	718	16	0.97
SS-08	42.2	53.3	0.79	0.067 2	0.004 8	1.177 8	0.082 6	0.127 1	0.003 3	845	148	790	39	771	19	0.98
SS-09	210.9	171.2	1.23	0.063 9	0.003 4	1.039 9	0.056 1	0.118 0	0.002 6	739	111	724	28	719	15	0.99
SS-10	49.0	64.6	0.76	0.063 4	0.004 1	1.050 4	0.069 4	0.120 2	0.003 0	721	122	729	34	732	17	1.00
SS-11	18.7	40.5	0.46	0.062 0	0.005 3	1.003 2	0.085 8	0.117 3	0.003 3	675	164	705	43	715	19	1.01
SS-12	45.8	76.5	0.60	0.064 4	0.006 1	1.094 7	0.111 9	0.123 3	0.003 4	755	195	751	54	749	19	1.00
SS-13	133.8	144.0	0.93	0.069 3	0.005 1	1.090 6	0.075 6	0.114 2	0.002 9	907	144	749	37	697	17	0.93

续表 2

测点	$\omega_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma					谐和度	
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		1σ
SS-14	128.0	137.6	0.93	0.064 6	0.003 7	1.054 1	0.061 0	0.118 3	0.002 7	762	120	731	30	721	16	0.99
SS-15	103.3	112.8	0.92	0.059 4	0.003 6	1.028 4	0.061 4	0.125 5	0.003 0	583	129	718	31	762	17	1.06
SS-16	56.6	85.8	0.66	0.070 3	0.006 3	1.219 6	0.102 4	0.125 9	0.004 1	936	219	810	47	765	23	0.94
SS-17	46.2	55.1	0.84	0.062 8	0.005 5	1.091 0	0.091 8	0.125 9	0.003 6	702	223	749	45	765	20	1.02
SS-18	60.4	58.1	1.04	0.063 5	0.005 0	1.086 2	0.082 7	0.124 1	0.003 2	725	195	747	40	754	18	1.01
SS-19	88.7	102.8	0.86	0.063 6	0.009 0	1.062 4	0.167 8	0.121 2	0.003 5	727	321	735	83	738	20	1.00
SS-20	58.3	67.0	0.87	0.062 8	0.008 5	1.067 7	0.163 7	0.123 4	0.003 8	700	310	738	80	750	22	1.02
SS-21	84.3	93.1	0.91	0.068 7	0.004 9	1.208 2	0.085 5	0.127 6	0.003 4	889	146	804	39	774	19	0.96
SS-22	33.2	44.3	0.75	0.068 0	0.004 8	1.124 3	0.081 3	0.119 9	0.003 4	870	144	765	39	730	20	0.95
SS-23	121.9	135.2	0.90	0.065 6	0.003 9	1.141 3	0.067 2	0.126 2	0.002 9	794	124	773	32	766	17	0.99
XFZ-01	58.8	107.2	0.55	0.065 9	0.004 2	1.085 5	0.069 1	0.119 5	0.002 9	802	129	746	34	728	17	0.98
XFZ-02	66.4	92.9	0.71	0.066 3	0.004 4	1.079 1	0.074 5	0.118 0	0.003 1	817	151	743	36	719	18	0.97
XFZ-03	169.2	210.6	0.80	0.067 3	0.003 7	1.153 6	0.064 4	0.124 4	0.002 8	845	106	779	30	756	16	0.97
XFZ-04	183.2	172.0	1.07	0.065 0	0.004 1	1.066 0	0.066 1	0.119 0	0.002 9	774	122	737	32	725	16	0.98
XFZ-05	401.2	416.7	0.96	0.065 8	0.003 4	1.065 1	0.055 3	0.117 3	0.002 5	801	101	736	27	715	14	0.97
XFZ-06	108.2	183.5	0.59	0.066 3	0.003 8	1.158 7	0.066 6	0.126 8	0.002 9	815	125	781	31	770	16	0.99
XFZ-07	129.0	89.9	1.44	0.069 1	0.004 1	1.214 7	0.075 7	0.127 5	0.003 1	901	130	807	35	774	17	0.96
XFZ-08	152.1	187.2	0.81	0.068 0	0.003 9	1.163 0	0.065 5	0.124 1	0.002 8	868	124	783	31	754	16	0.96
XFZ-09	145.6	186.3	0.78	0.064 7	0.003 9	1.123 1	0.066 8	0.125 9	0.002 9	764	114	764	32	765	16	1.00
XFZ-10	142.7	162.5	0.88	0.063 2	0.003 6	1.083 1	0.061 0	0.124 3	0.002 9	714	108	745	30	755	16	1.01
XFZ-11	188.2	244.3	0.77	0.066 3	0.003 4	1.114 2	0.057 0	0.121 9	0.002 6	815	98	760	27	742	15	0.98
XFZ-12	110.1	152.2	0.72	0.066 9	0.004 0	1.107 3	0.065 7	0.120 1	0.002 7	833	113	757	32	731	16	0.97
XFZ-13	267.6	295.7	0.91	0.062 6	0.003 5	1.064 6	0.058 1	0.123 4	0.002 7	694	108	736	29	750	15	1.02
XFZ-14	458.9	436.0	1.05	0.063 2	0.003 4	1.037 4	0.055 7	0.119 1	0.002 6	714	114	723	28	725	15	1.00
XFZ-15	222.4	285.3	0.78	0.065 1	0.003 4	1.129 0	0.059 4	0.125 7	0.002 8	778	110	767	28	763	16	1.00
XFZ-16	261.6	286.9	0.91	0.063 1	0.003 6	1.072 2	0.060 7	0.123 3	0.002 7	711	116	740	30	749	16	1.01
XFZ-17	158.9	155.8	1.02	0.062 3	0.004 0	1.038 4	0.066 7	0.120 9	0.002 9	684	133	723	33	736	16	1.02
XFZ-18	494.2	364.9	1.35	0.065 6	0.003 5	1.089 4	0.058 4	0.120 5	0.002 6	793	119	748	28	733	15	0.98
XFZ-19	116.0	172.3	0.67	0.063 7	0.003 5	1.094 6	0.060 4	0.124 6	0.002 8	732	125	751	29	757	16	1.01
XFZ-20	106.0	127.8	0.83	0.064 0	0.004 1	1.136 8	0.072 1	0.128 9	0.003 2	741	142	771	34	781	18	1.01
XFZ-21	119.5	167.1	0.72	0.068 2	0.004 0	1.137 0	0.067 2	0.120 9	0.002 9	874	117	771	32	736	16	0.96
XFZ-22	149.3	127.1	1.17	0.062 6	0.004 1	1.092 5	0.069 8	0.126 5	0.002 9	696	145	750	34	768	17	1.02

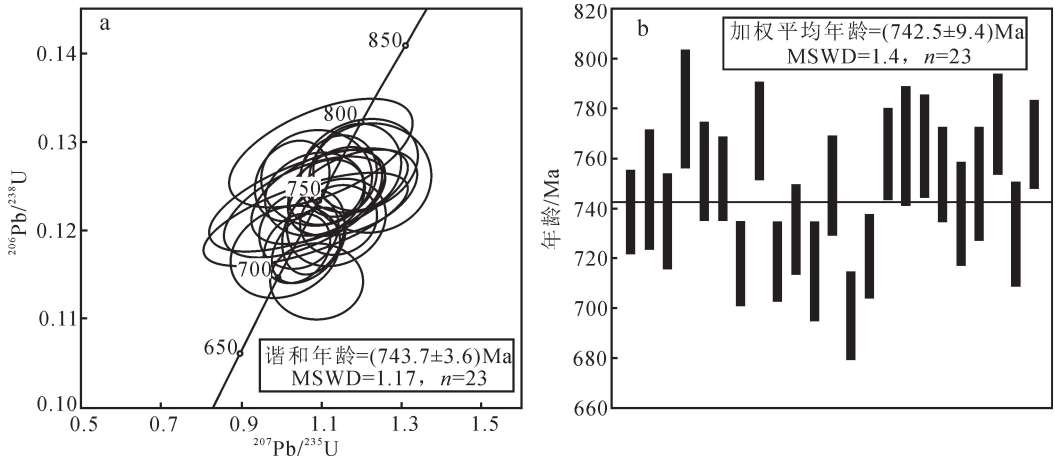


图 8 宋山花岗岩片麻岩锆石 U-Pb 年龄谐和图 (a) 和加权平均年龄 (b)

Fig.8 Zircons U-Pb age concordia diagram (a) and weighted mean age diagram (b) of Songshan granite gneiss

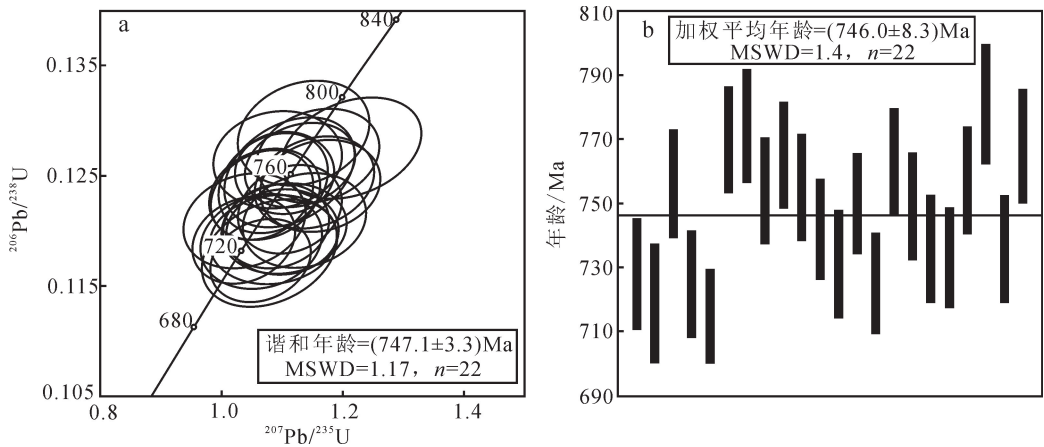


图 9 小范庄花岗岩片麻岩锆石 U-Pb 年龄谐和图 (a) 和加权平均年龄 (b)

Fig.9 Zircons U-Pb age concordia diagram (a) and weighted mean age diagram (b) of Xiaofanzhuang granite gneiss

5 讨论

5.1 分离结晶

在 Harker 图解(图 10a—c)上,随着 SiO_2 质量分数的升高,全碱、 TFeO 、 TiO_2 等质量分数逐渐降低,显示在岩浆演化过程中,以斜长石和钾长石的分离结晶为主,可能还有少量的镁铁质矿物。角闪石的分离结晶可能会导致熔体 Y/Yb 值升高^[21],研究区花岗岩片麻岩的 Y/Yb 值集中在 6.94~9.57 之间,说明并未发生明显的角闪石分离结晶。根据微量元素变化趋势与矿物相分离结晶的关系^[22-24](图 10d—i),分离结晶的矿物相主要为斜长石和钾长石,少量的镁铁质矿物则以黑云母的分离结晶为主。与之一致的是,稀土和微量配分模式图中显著 Eu、Sr 负异常亦显示明显的长石分离结晶,此外,显著的

P、Ti、Ba 负异常,暗示在原岩形成过程中磷灰石、钛-磁铁矿和黑云母的分离可能也起到一定的作用。

5.2 成因类型

花岗岩的成因分类有多种划分方法,其中 S-I-M-A 得到广泛应用^[25-27],将花岗岩按其成因划分为 S 型(壳源)^[28]、I 型(壳幔混合)^[29]、M 型(幔源)^[30] 和 A 型(碱性)^[30]。

研究区花岗岩片麻岩在主要元素上表现为高 SiO_2 、富碱、贫 CaO 、低 Al_2O_3 质量分数,以及高 $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ 值的特征,其造岩矿物以石英和钾长石为主,均显示典型的 A 型花岗岩特征^[31]。在微量元素方面,明显亏损 Eu、Sr、Ba、Ti、P 等元素,富集 Rb、Zr、Hf、Y 等元素,具有右倾海鸥型稀土配分曲线,均为 A 型花岗岩的典型特征^[32-34]。

值得注意的是,研究区花岗岩片麻岩显著的 Nb、

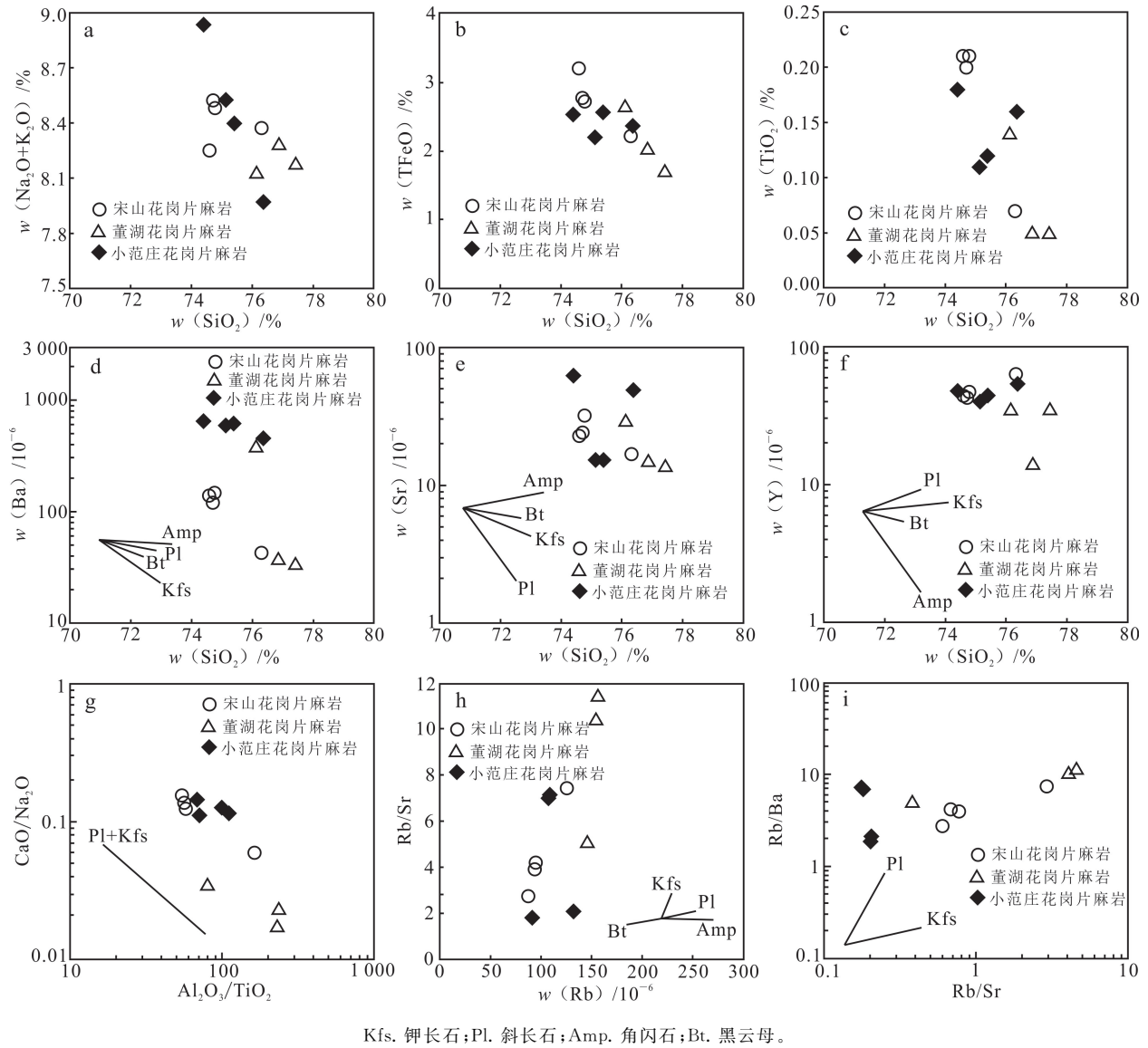


图 10 研究区花岗岩片麻岩 Harker 图解(a-c)和微量元素变化趋势与结晶关系图(d-i)

Fig.10 Harker diagrams (a-c) and the relationship between trace element trends and crystallization (d-i) of granite gneiss in study area

Ta 负异常亦与典型的 A 型花岗岩不同^[13,25],其 Nb 质量分数较低,仅为(5.50~16.30)×10⁻⁶,平均为 11.93×10⁻⁶,明显低于典型的 A 型花岗岩(37×10⁻⁶),高于 M 型花岗岩(1.3×10⁻⁶),与 I 型和 S 型花岗岩(11×10⁻⁶)更为接近,这与苏鲁造山带同期的 A 型花岗岩具有相似的特征^[4,35]。另一方面,研究区花岗岩片麻岩 Nb/Ta 值较高,介于 11.17~32.00 之间,平均为 18.98,略高于 A 型花岗岩(12.0~17.5),明显高于 I 型、S 型(<10.0)和 M 型(11.0)花岗岩^[13]。

为了更加精准地反映研究区花岗岩片麻岩的成因

类型,本文选取了在变质过程中较稳定的微量元素 Zr、Ce、Y,并结合主量元素进行综合判别。在花岗岩成因类型判别图解(图 11)上,所有样品均落入 A 型花岗岩区域内,表明研究区花岗岩片麻岩应属 A 型花岗岩。

5.3 源区特征

A 型花岗岩的成因和岩浆源区性质一直饱受争议,主要有 3 个观点,即幔源岩浆结晶分异^[36-37]、幔源和壳源物质的混合熔融^[38-39]以及壳源物质的部分熔融^[40]。

在岩浆演化过程中,研究区花岗岩片麻岩发生了

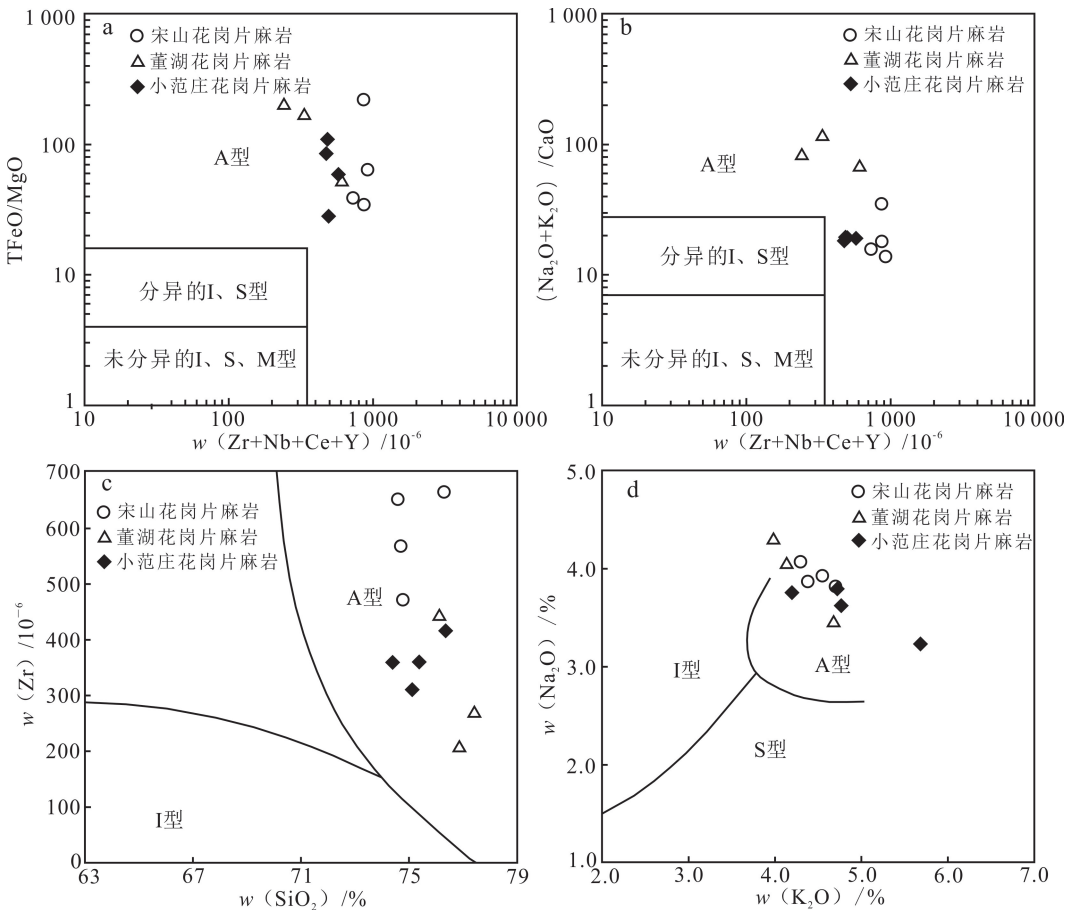


图 11 研究区花岗片麻岩成因类型判别图解

Fig.11 Discriminant diagram of genetic types for granite gneiss in the study area

显著的斜长石分离结晶,其具有明显的 Eu、Sr 负异常以及较低的 La/Yb 值(平均 9.74),表明岩浆源区存在富 Ca 斜长石残留相,且不存在石榴子石残留相^[41-42]。

研究区花岗片麻岩具有高 SiO₂、低 MgO 质量分数的特点,表明其主要来源于壳源物质的部分熔融。而新沂地区新元古代除花岗岩侵入外,还存在同期的基性岩(榴辉岩原岩)的侵入,其侵位年龄可能略早于花岗片麻岩,野外亦发现岩体中含有榴辉岩包体,表明存在壳幔物质的混合作用^[41],因此不能忽视幔源物质的贡献。

微量元素及其比值亦能很好地反映源区特征。表 3 显示,研究区花岗片麻岩 Th/U、Nd/Th、Nb/U、Ce/Pb、La/Yb 值等元素比值与地幔差异明显,与下地壳更为接近,显示出壳源的特征。实验岩石学对花岗岩不同源岩进行了大量的熔融实验研究,结果表明来自基性岩熔融的岩浆比来自沉积岩熔融的岩浆具有较高的 Al₂O₃+TFeO+MgO+TiO₂ 质

量分数以及较低的 Al₂O₃/(TFeO+MgO+TiO₂)、(Na₂O+K₂O)/(MgO+TFeO+TiO₂) 值^[44-46]。在图 12 中,所有样品均落入杂砂岩区域及其附近,亦显示来自壳源物质的部分熔融。但值得注意的是,研究区花岗片麻岩 Nb/Ta 值较高,并且微量元素 U、Ce/Pb、La/Yb 值等元素比值与地幔差异明显,与下地壳更为接近,显示出壳源的特征。实验岩石学对花岗岩不同源岩进行了大量的熔融实验研究,结果表明来自基性岩熔融的岩浆比来自沉积岩熔融的岩浆具有较高的 Al₂O₃+TFeO+MgO+TiO₂ 质量分数以及较低的 Al₂O₃/(TFeO+MgO+TiO₂)、(Na₂O+K₂O)/(MgO+TFeO+TiO₂) 值^[44-46]。在图 12 中,所有样品均落入杂砂岩区域及其附近,亦显示来自壳源物质的部分熔融。但值得注意的是,研究区花岗片麻岩 Nb/Ta 值较高,并且微量元素比值的范围较宽,均值略向原始地幔靠近,暗示其岩浆源区可能有少量幔源物质的参与。结合同期基性岩以及榴辉岩包体的存在事实,笔者认为研究

表 3 研究区花岗片麻岩与地幔、地壳的微量元素比值对比

Table 3 Comparison of trace element ratios between granite gneiss, mantle, and crust

元素比值	Nb/Ta	Th/U	Zr/Hf	Nd/Th	Nb/U	Ce/Pb	Zr/Nb	La/Yb	Nb/La	Zr/La	Rb/Nb	Y/Nb
研究区 最大值	32.00	13.21	51.76	9.00	17.28	23.11	53.44	28.60	1.44	35.42	28.45	6.44
花岗片 最小值	11.17	6.21	26.57	0.69	5.19	0.55	22.64	1.93	0.09	4.47	6.81	1.66
麻岩 均值	19.38	9.55	36.69	3.78	10.14	5.74	37.21	9.74	0.54	16.47	11.14	3.71
原始地幔	17.39	3.15	36.25	15.93	26.41	9.59	15.71	0.63	2.30	36.13	0.89	6.10
地壳	11.00	3.85	33.33	—	12.09	0.41	9.09	7.27	0.69	6.25	2.91	1.82
上地壳	16.22	5.77	36.72	3.40	7.74	3.69	15.67	15.40	0.34	5.40	6.83	1.45
中地壳	20.00	6.71	36.12	3.83	10.78	4.02	15.73	14.19	0.36	5.62	6.09	1.55
下地壳	16.67	6.08	38.57	4.78	11.63	4.08	16.20	12.66	0.34	5.59	5.60	1.80

注:原始地幔数值据文献[19];地壳数值据文献[43];上地壳、中地壳和下地壳数值据文献[13]。

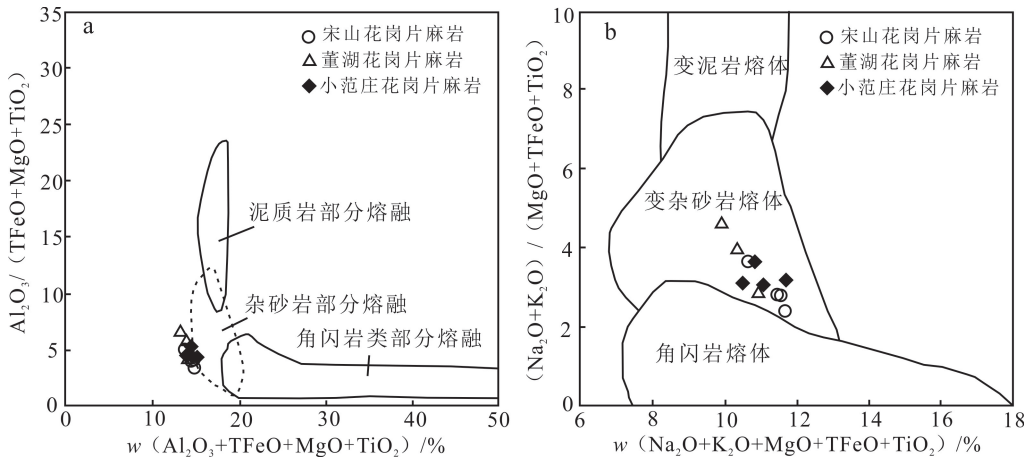


图 12 研究区花岗片麻岩物质来源判别图解

Fig.12 Discriminant diagram of material source for granite gneiss in study area

区花岗片麻岩主要来源于下地壳物质的部分熔融,且加入了少量的幔源物质。

5.4 与超高压变质作用的关系

在苏鲁造山带内,榴辉岩作为典型的超高压变质岩,与花岗片麻岩密切伴生。对于超高压变质岩与花岗片麻岩的关系究竟是“就地”的还是“外来”的,至今仍在争论中[8,47-48]。“就地”观点认为,花岗片麻岩在超高压变质之前就已形成,之后与基性岩、表壳岩一起俯冲至上地幔,并经历了超高压变质作用,再快速抬升至地表;“外来”观点认为,花岗片麻岩与超高压变质岩呈构造接触关系,并不是正常的侵入接触。

在宋山花岗片麻岩和董湖花岗片麻岩中均发现了榴辉岩包体,这表明花岗片麻岩的原岩侵入时榴辉岩的原岩就已经就位,两者并非构造接触关系,而呈“就地”关系。确认超高压变质岩与花岗片麻岩的

关系,关键还在于花岗片麻岩是否经历了超高压变质作用[47]。在山东诸城荣成片麻岩套和东海大陆科学钻探工程预先导孔中的花岗质片麻岩均发现了含柯石英包体的锆石[8,47-48],这说明花岗片麻岩普遍经历了超高压变质作用,进一步佐证了“就地”观点。

5.5 构造环境

不同构造背景所产生的花岗岩具有不同的微量元素组成,Rb、Y、Yb、Nb、Ta、Hf 等元素常被用来判别花岗岩的构造环境。在 w(Rb)-w(Y+Nb)、R₂-R₁ 判别图解(图 13a、b)中,样品均落入后碰撞构造背景区域。

A 型花岗岩产于特殊的构造背景,仅通过普通花岗岩的构造判别图解可能会导致其产生偏差。Eby[49]将 A 型花岗岩进一步分为 A₁型和 A₂型,其中:A₁型形成于热点、地幔柱及大陆裂谷或板内等非造山环境,具有洋岛玄武岩的地球化学特征;A₂

型形成于后碰撞、岛弧、大陆边缘等构造环境下,主要源自大陆地壳或下地壳。在 A 型花岗岩构造环境判别图解(图 13c、d)中,所有样品均落入 A₂ 花岗岩区域,进一步表明研究区花岗片麻岩形成于后碰撞伸展环境,其物质主要来自于壳源。

5.6 对 Rodinia 超大陆裂解的响应

Rodinia 超大陆汇聚和裂解是地学界研究的热点之一,很多学者认为超大陆的汇聚时期为 1 100~900 Ma,裂解时期主要集中在 800~700 Ma 之间^[50-51],但汇聚与裂解过程具有明显的时、空分布不均一性及较大的穿时性。江南造山带及扬子板块西北缘存在的俯冲带和火山弧(950~880 Ma)为晋宁造山运动的产物,被认为是对 Rodinia 超大陆汇聚的响应^[52];在柴达木盆地北缘发现的花岗片麻岩(803 Ma)被认为是汇聚过程的产物。Rodinia 超大陆裂解的地质记录广泛保存于我国老陆块内部及其边缘,其中在扬子板块最为发育,其最早启动时间为 820~800 Ma,一直持续到 700 Ma,在 750 Ma 左右

达到峰期^[50,53-54]。塔里木盆地和柴达木盆地接受沉积的时间大概在 800 Ma 左右^[50],柴达木北缘蛇绿岩形成于 800~750 Ma^[55],南秦岭的基性岩墙群的年龄为 830~750 Ma,华北陆块东南缘广泛发育震旦系碳酸盐岩以及新元古代辉绿岩群^[56],这些均被认为与 Rodinia 超大陆裂解有关。

苏鲁造山带作为年轻的造山带,发育着大规模的新元古代基性岩群和 A 型花岗岩(780~680 Ma),被认为形成于 Rodinia 超大陆裂解时的被动陆缘裂谷环境^[4]。研究区花岗片麻岩形成于 746.0~742.5 Ma,属于典型的 A 型花岗岩,属苏鲁造山带新元古代岩浆事件。但不同的是,研究区花岗片麻岩的构造判别显示其形成于后碰撞(A₂)伸展环境,而非大陆裂谷环境。

对于后碰撞环境的解释,Harris 等^[57]将后碰撞作为碰撞结束之后的过程。Liegeois 等^[58]进行了全面阐述,认为后碰撞是指时间上比碰撞作用晚,但仍与碰撞作用有关,而不是非造山过程,通常始于板

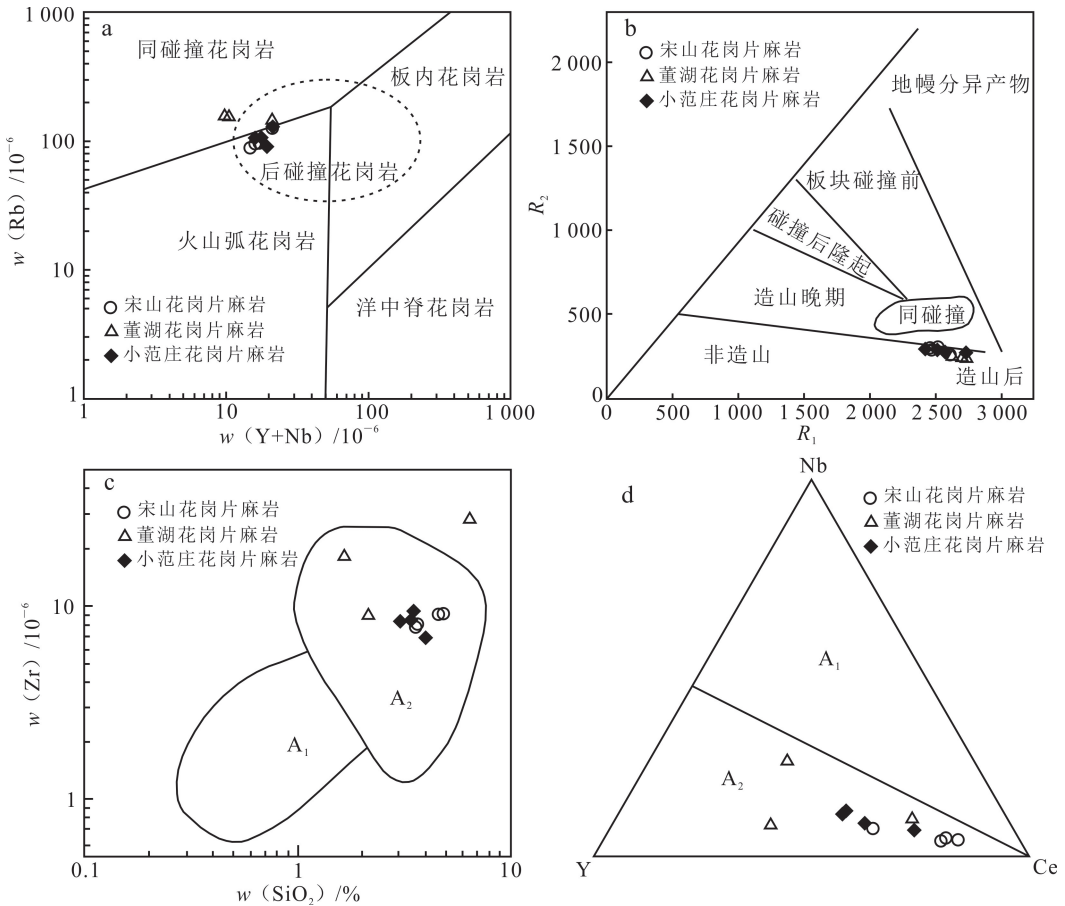


图 13 研究区花岗片麻岩构造环境判别图解

Fig.13 Discriminant diagram of construction environment for granite gneiss in the study area

内环境,且伴有大陆块体的大规模水平运动、岩石圈拆沉、小型海洋板块的拉张和裂谷作用等。Turner 等^[59-60]认为,后碰撞相当于造山带演化的“晚造山阶段”,可以持续到“非造山”阶段开始。因此,A₂型花岗岩可作为 Rodinia 超大陆裂解启动的地质记录。

事实上,A₂型花岗岩在扬子陆块广泛发育,形成时代集中在 830~800 Ma 之间^[60-65],该期岩浆活动普遍被认为与 Rodinia 超大陆裂解密切相关,指示着 Rodinia 超大陆裂解事件的开始。同处于苏鲁造山带的东海片麻状花岗岩为 A₂型花岗岩,形成时代为 770 Ma,被认为是 Rodinia 超大陆裂解事件在该地区的最初响应^[35]。不同的是,扬子陆块内的 A₂型花岗岩比苏鲁造山带内的 A₂型花岗岩更老。扬子陆块强烈发育与 Rodinia 超大陆裂解有关的地质记录,显示扬子陆块可能是连接北美和澳大利亚—南极大陆之间的桥梁和 Rodinia 超大陆的“核心”^[62,66],苏鲁造山带地处扬子陆块北缘,对 Rodinia 超大陆裂解的响应可能较晚。

因此笔者认为,746.0~742.5 Ma 侵入的花岗片麻岩是 Rodinia 超大陆裂解事件在苏鲁造山带新沂地区的最初响应,表明该区实现了从碰撞挤压向伸展的过渡,之后随着拉张程度加大,裂谷化趋势逐渐增强,岩浆活动愈加强烈。

6 结论

1)研究区花岗片麻岩位于苏鲁造山带的西缘,包括宋山花岗片麻岩、董湖花岗片麻岩和小范庄花岗片麻岩等 3 处岩体,岩性以黑云(角闪)花岗质片麻岩为主,侵位于东海变质岩群或榴辉岩中,含榴辉岩包体。

2)研究区花岗片麻岩的原岩性质为火成岩,具有高 SiO₂、富碱、贫 CaO、低 Al₂O₃ 质量分数的特征,属准铝质-弱过铝质花岗岩。稀土元素配分模式为轻稀土元素略富集、重稀土元素略亏损的右倾海鸥型曲线,富集大离子亲石元素 Rb、K、Pb 和高场强元素 Zr、Hf、Th、HREE,严重亏损大离子亲石元素 Ba、Sr、Eu 和高场强元素 Nb、Ta、Ce、Ti。

3)研究区花岗片麻岩属典型的 A 型花岗岩。其来自下地壳为主、少量幔源物质的部分熔融,经过了以钾长石和斜长石为主、少量黑云母的分选结晶演化过程,而后与基性岩、表壳岩一起俯冲、折返,经历超高压变质作用最终形成。

4)研究区花岗片麻岩形成于新元古代(746.0~742.5 Ma)后碰撞伸展环境,是 Rodinia 超大陆裂解事件在苏鲁造山带新沂地区的最初响应,表明该区实现了从碰撞挤压向伸展的过渡,之后随着拉张程度加大,裂谷化趋势逐渐增强,岩浆活动愈加强烈。

致谢:本文撰写过程中,江苏省地质矿产局第五地质大队周贤金研究员级高级工程师、刘爱斌研究员级高级工程师、宗德林研究员级高级工程师、蔡承刚研究员级高级工程师和钱静高级工程师给予了大力帮助,在此一并致以诚挚的谢意!

参考文献(References):

- [1] 冯鹏. 苏鲁造山带内多期部分熔融及其大地构造意义[D]. 北京:中国地质大学(北京),2019.
Feng Peng. Multiple Episodes of Partial Melting Events in the Sulu Orogen [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2019.
- [2] 郑永飞. 超高压变质与大陆碰撞研究进展:以大别—苏鲁造山带为例[J]. 科学通报,2008,53(18):2129-2152.
Zheng Yongfei. Research Progress on Ultrahigh Pressure Metamorphism and Continental Collision: Taking the Dabie-Sulu Orogenic Belt as an Example [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(18): 2129-2152.
- [3] 贾根,徐士银,郭钢,等. 江苏省大地构造主要特征及其演化[J]. 地质力学学报,2016,22(3):620-631.
Jia Gen, Xu Shiyin, Guo Gang, et al. The Main Characteristics and Evolution of Geotectonics in Jiangsu Province[J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(3): 620-631.
- [4] 许志琴,刘福来,戚学祥,等. 南苏鲁超高压变质地体中罗迪尼亚超大陆裂解事件的记录[J]. 岩石学报,2006,22(7):1745-1760.
Xu Zhiqin, Liu Fulai, Qi Xuexiang, et al. Record for Rodinia Supercontinent Breakup Event in the South Sulu Ultra-High Pressure Metamorphic Terrane[J]. Acta Petrological Sinica, 2006, 22(7): 1745-1760.
- [5] 徐树桐,刘贻灿,陈冠宝,等. 大别山、苏鲁地区榴辉岩中新发现的微粒金刚石[J]. 科学通报,2003,48(10):1069-1075.
Xu Shutong, Liu Yican, Chen Guanbao, et al. Newly Discovered Particulate Diamonds in Rclongites from the Dabie Mountains and Sulu Areas [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(10): 1069-1075.
- [6] 杨经绥. 中央碰撞造山带中两期超高压变质作用:来

- 自含柯石英锆石的定年证据[J]. 地质学报, 2003, 77(14): 463-477.
- Yang Jingsui. Two Ultrahigh Pressure Metamorphic Events Recognized in the Central Orogenic Belt of China: Evidence from the U - Pb Dating of Coesite-bearing Zircons[J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(14): 463-477.
- [7] 薛怀民, 刘福来, 孟繁聪. 苏鲁造山带胶南区段片麻岩原岩的成因: 地球化学及 Nd 同位素证据[J]. 岩石学报, 2007, 23(12): 3239-3248.
- Xue Huaimin, Liu Fulai, Meng Fancong. Geochemical and Nd Isotopic Evidence for the Genesis from the Southern Shandong Peninsula Sulu Orogen[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 23(12): 3239-3248.
- [8] 宋明春, 韩景敏, 宫述林. 苏鲁造山带大规模岩浆活动的证据: 新元古代多成因花岗岩片麻岩[J]. 矿物岩石, 2007, 27(2): 22-32.
- Song Mingchun, Han Jingmin, Gong Shulin. Diversified Origin Granitic Gneiss in the Sulu Ultrahigh Pressure Metamorphic Belt: Evidence for Neoproterozoic Large Scale Magmatism[J]. Mineral Petrol, 2007, 27(2): 22-32.
- [9] 许志琴, 张泽明, 刘福来, 等. 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, 2003, 77(4): 433-450.
- Xu Zhiqin, Zhang Zeming, Liu Fulai, et al. Exhumation Structure and Mechanism of the Sulu Ultrahigh-Pressure Metamorphic Belt, Central China [J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(4): 433-450.
- [10] 刘福来, 许志琴, 张泽明, 等. 中国大陆科学钻探工程预先导孔中片麻岩-花岗质片麻岩的岩石学和地球化学研究[J]. 地质学报, 2001, 75(1): 70-81.
- Liu Fulai, Xu Zhiqin, Zhang Zeming, et al. Petrology and Geochemistry of Gneiss and Granitic Gneiss from Pre-Pilot Drillhole(CCSDB-PP1) Chinese Continental Scientific Drilling Project[J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75(1): 70-81.
- [11] 许志琴, 曾令森, 梁凤华, 等. 大陆板片多重性俯冲与折返的动力学模式: 苏鲁高压-超高压变质地体的折返年龄限定[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 24(5): 357-368.
- Xu Zhiqin, Zeng Lingsen, Liang Fenghua, et al. A Dynamic Model for Sequential Subduction and Exhumation of a Continental Slab: Age Constraints on the Timing of Exhumation of the Sulu HP-UHP Metamorphic Terrane [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2005, 24(5): 357-368.
- [12] Ludwig K. Isoplot/Ex, A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel; Version 3.00 [J]. Berkeley Geochronology Centre, 2003, 4: 1-71.
- [13] 赵振华. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 392-400.
- Zhao Zhenhua. Principles of Trace Element Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 2016: 392-400.
- [14] 薛怀民, 刘福来. 中国大陆科学钻探工程主孔 0~2 000 米斜长片麻岩的地球化学性质及成因研究[J]. 岩石学报, 2005, 21(2): 355-368.
- Xue Huaimin, Liu Fulai. Geochemical Characteristics and Genesis of Plagiogneiss from the 0-2 000 m Main Hole of the Chinese Continental Scientific Drilling Project[J]. Acta Petrological Sinica, 2005, 21(2): 355-368.
- [15] Shaw D M. The Origin of the Apsley Gneiss, Ontario [J]. Earth Sci, 1972, 9: 18-35.
- [16] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Intites[J]. Nature, 1982, 299: 715-717.
- [17] 薛怀民, 刘福来, 孟繁聪. 苏鲁造山带胶东区段花岗岩片麻岩类的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, 2006, 22(7): 1779-1790.
- Xue Huaimin, Liu Fulai, Meng Fancong. Major and Trace Element Geochemistry of Granitic Gneisses from Sulu Orogeny, Eastern Shandong Peninsula: Evidence for a Neoproterozoic Active Continental Margin in the Northern Margin of the Yangtze Craton [J]. Acta Petrological Sinica, 2006, 22(7): 1779-1790.
- [18] Boynton W V. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies [J]. Amsterdam: Elsevier, 1984, 3(8): 63-114.
- [19] Sun S S, McDonough W F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes [J]. Geological Society, London, Special Publication, 1989, 42(1): 313-345.
- [20] 陈岩滨, 夏立元, 王翔, 等. 内蒙古中部察哈尔右翼后旗中二叠世石英二长岩锆石 U-Pb 定年及地球化学特征[J]. 世界地质, 2022, 41(4): 689-702.
- Chen Yanbin, Xia Liyuan, Wang Xiang, et al. Zircon U - Pb Dating and Geochemical Characteristics of Middle Permian Quartz Monzonite in Chahar Right

- Back Banner, Central Inner Mongolia [J]. *World Geology*, 2022, 41(4): 689 - 702.
- [21] Rollinson H. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation[M]. Harlow: Longman Press, 1993: 1 - 352.
- [22] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991: 57 - 66.
- Li Changnian. Igneous Rock Trace Element Petrology [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1991: 57 - 66.
- [23] 薛怀民, 刘福来, 许志琴. 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*, 2005, 32(2): 249 - 258.
- Xue Huaimin, Liu Fulai, Xu Zhiqin. Geochemical Characteristics of Weakly Metamorphosed Orthogneisses Outsides the Wulian Boundary Fault Along the Northwestern Margin of the Sulu UHP Metamorphic Belt and Their Protolith Petrogenesis [J]. *Geology in China*, 2005, 32(2): 249 - 258.
- [24] 孟恩, 刘福来, 刘建辉, 等. 辽东南长海地区花岗质片麻岩类的地球化学特征: 对其原岩性质及形成环境的制约[J]. *岩石学报*, 2012, 28(9): 2793 - 2806.
- Meng En, Liu Fulai, Liu Jianhui, et al. Geochemical Characteristics of the Changhai Granitic Gneisses in Southeast Liaoning Province, NE China: Implications for Its Protolith Property and Formed Tectonic Setting[J]. *Acta Petrological Sinica*, 2012, 28(9): 2793 - 2806.
- [25] 庞迎春, 程顺波. 花岗岩分类问题研究现状[J]. *资源环境与工程*, 2009, 23(2): 119 - 137.
- Pang Yingchun, Cheng Shunbo. Research Status of Granite Classification[J]. *Resources Environment and Engineering*, 2009, 23(2): 119 - 137.
- [26] 陈建林, 郭原生, 付善明. 花岗岩研究进展: ISMA 花岗岩类分类综述[J]. *甘肃地质学报*, 2004, 13(1): 67 - 73.
- Chen Jianlin, Guo Yuansheng, Fu Shanming. The Research Headway to Granitoid: Classification Review and Synthesis of ISMA Granitoid[J]. *Acta Geologica Gansu*, 2004, 13(1): 67 - 73.
- [27] 王国辉, 王志忠, 严城民. 花岗岩成因类型划分与地球化学图解判别综述[J]. *云南地质*, 2019, 38(1): 28 - 37.
- Wang Guohui, Wang Zhizhong, Yan Chengmin. A Survey of the Genesis Classification and Geochemical Diagram Discrimination of Granite [J]. *Yunnan Geology*, 2019, 38(1): 28 - 37.
- [28] Chappell B W, White A J R. Two Contrasting Granite Types[J]. *Pacific Geol*, 1974, 8: 173 - 174.
- [29] Picher W S. Granite Type and Tectonic Environment [M]. London: Academic Press, 1983: 19 - 40.
- [30] Loiselle M U, Wones D R. Characteristics and Origin of Anorogenic Granites [J]. *Geolo Soci Amer*, Abstracr, 1979, 11: 468.
- [31] 贺根文, 周兴华, 袁慧香, 等. 赣南高陂花岗斑岩地球化学、年代学特征及其对成矿作用的启示[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2023, 53(1): 161 - 176.
- He Genwen, Zhou Xinghua, Yuan Huixiang, et al. Geochemistry and Geochronology of Cretaceous Granite Porphyry in Gaobei, South Jiangxi Province and Its Implications for Mineralization[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53(1): 161 - 176.
- [32] 吴锁平, 王梅英, 戚开静. A 型花岗岩研究现状及其述评[J]. *岩石矿物学杂志*, 2007, 26(1): 57 - 66.
- Wu Suoping, Wang Meiyang, Qi Kaijing. Present Situation of Researches on A - Type Granites: A Review[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2007, 26(1): 57 - 66.
- [33] 姚国华, 胡乔青, 牛文林, 等. 内蒙古正镶白旗都地区石英斑岩和花岗斑岩年代学、地球化学特征及岩石成因[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(3): 899 - 916.
- Yao Guohua, Hu Qiaoqing, Niu Wenlin, et al. Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of Quartz Porphyry and Granite Porphyry in Dubi Area, Zhengxiangbai Banner, Inner Mongolia[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(3): 899 - 916.
- [34] 王晓亮, 陈军典, 程识, 等. 辽东半岛金家岭花岗岩体 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 年代学、地球化学特征及地质意义[J]. *世界地质*, 2023, 42(1): 11 - 25.
- Wang Xiaoliang, Chen Jundian, Cheng Shi, et al. LA - ICP - MS Zircon U - Pb Chronology, Geochemical Characteristics and Geological Significances of Jinjialing Granite in Liaodong Peninsula[J]. *World Geology*, 2023, 42(1): 11 - 25.
- [35] 胡建, 邱检生, 王汝成, 等. 新元古代 Rodinia 超大陆裂解事件在扬子北东缘的最初响应: 东海片麻状碱性花岗岩的锆石 U - Pb 年代学及 Nd 同位素制约[J]. *岩石学报*, 2007, 23(6): 1321 - 1333.
- Hu Jian, Qiu Jiansheng, Wang Rucheng, et al. Earliest Response of the Neoproterozoic Rodinia

- Break-up in the Northeastern Yangtze Craton: Constraints from Zircon U - Pb Geochronology and Nd Isotopes of the Gneissic Alkaline Granites in Donghai Area[J]. *Acta Petrological Sinica*, 2007, 23(6): 1321 - 1333.
- [36] Eby G N. The A - Type Granitoids: A Review of Their Occurrence and Chemical Characteristics and Speculations on Their Petrogenesis[J]. *Lithos*, 1990, 26(1/2): 115 - 134.
- [37] Frost C D, Frost B R, Chamberlain K R et al. Petrogenesis of the 1.43 Ga Sherman Batholith, SE Wyoming, USA: A Reduced, Rapakivi-Type Anorogenic granite[J]. *Journal of Petrology*, 1999, 40: 1771 - 1802.
- [38] Goodenough K M, Upton B G J, Ellam R M. Geochemical Evolution of the Ivigtut Granite, South Greenland: A Fluorine-Rich "A - Type" Intrusion[J]. *Lithos*, 2000, 51(3): 205 - 221.
- [39] Bonin B. A - Type Granites and Related Rocks: Evolution of A concept, Problems and Prospects[J]. *Lithos*, 2007, 97(1/2): 1 - 29.
- [40] Collins W J, Beams S D, White A J R, et al. Nature and origin of A - Type Granites with Particular Reference to Southeastern Australia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1982, 80(2): 189 - 200.
- [41] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 2007, 23(6): 1217 - 1238.
Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, et al. Discussions on the Petrogenesis of Granites[J]. *Acta Petrological Sinica*, 2007, 23(6): 1217 - 1238.
- [42] 徐楠, 吴才来, 郑坤, 等. 南阿尔金茫崖 A 型花岗岩的成因及构造意义[J]. *地质学报*, 2020, 94(5): 1431 - 1449.
Xu Nan, Wu Cailai, Zheng Kun, et al. Petrogenesis and Tectonic Implications of the Mangya A - Type Alkali-Feldspar Granites in the South Altun, Northwest China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(5): 1431 - 1449.
- [43] Taylor S R, McLennan M S. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution* [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985: 57 - 372.
- [44] Altherr R, Siebel W. I - Type Plutonism in a Continental Back-Arc Setting: Miocene Granitoids and Monzonites from the Central Aegean Sea, Greece [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 143(4): 397 - 415.
- [45] 胡金. 云南省峨山花岗岩体新元古代岩浆演化及成矿制约[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
Hu Jin. *Neoproterozoic Magmatic Evolution and Its Constraints on Mineralization in the Eshan Granite Batholith, Yunnan* [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018.
- [46] 熊富浩. 东昆仑造山带东段古特提斯域花岗岩类时空分布、岩石成因及其地质意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
Xiong Fuhao. *Spatial-Temporal Pattern, Petrogenesis and Geological Implications of Paleo-Tethyan Granitoids in the East Kunlun Orogenic Belt (Eastern Segment)* [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2014.
- [47] 丛柏林, 王清晨. 大别山—苏鲁超高压变质带研究的最新进展[J]. *科学通报*, 1999, 44(11): 1127 - 1141.
Cong Bolin, Wang Qingchen. The Latest Progress in the Study of the Dabieshan-Sulu Ultrahigh Pressure Metamorphic Belt [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(11): 1127 - 1141.
- [48] 刘福来, 许志琴, 杨经绥, 等. 中国苏北预先导孔 CCSD - PP2 片麻岩中锆石的矿物包裹体及其超高压变质作用的证据[J]. *科学通报*, 2001, 46(3): 241 - 246.
Liu Fulai, Xu Zhiqin, Yang Jingsui, et al. Mineral Inclusions of Zircon in Pre-Pilot CCSD - PP2 Gneiss from Northern Jiangsu, China and Evidence for Ultrahigh Pressure Metamorphism [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(3): 241 - 246.
- [49] Eby G N. Chemical Subdivision of the A - Type Granitoids, Petrogenetic and Tectonic Implications[J]. *Geology*, 1992, 20: 641 - 644.
- [50] 陆松年. 新元古时期 Rodinia 超大陆研究进展述评[J]. *地质论评*, 1998, 44(5): 489 - 495.
Lu Songnian. A Review of Advance in the Research on the Neoproterozoic Rodinia Supercontinent [J]. *Geological Review*, 1998, 44(5): 489 - 495.
- [51] 陆松年. 从罗迪尼亚到冈瓦纳超大陆: 对新元古代超大陆研究几个问题的思考[J]. *地学前缘*, 2001, 8(4): 441 - 448.
Lu Songnian. From Rodinia to Gondwanaland Supercontinents: Thinking About Problems of Researching Neoproterozoic Supercontinents [J]. *Earth Science Frontiers*, 2001, 8(4): 441 - 448.
- [52] Li Z X, Li X H, Zhou H W, et al. Grenvillian Continental Collision in South China: New SHRIMP U - Pb Zircon Results and Implications for the Configuration of Rodinia [J]. *Geology*, 2002, 30(2): 163 - 166.

- [53] 李献华, 王选策, 李武显, 等. 华南新元古代玄武质岩石成因与构造意义: 从造山运动到陆内裂谷[J]. 地球化学, 2008, 37(4): 382-398.
Li Xianhua, Wang Xuance, Li Wuxian, et al. Petrogenesis and Tectonic Significance of Neoproterozoic Basaltic Rocks in South China: From Orogenesis to Intracontinental Rifting [J]. *Geochemica*, 2008, 37(4): 382-398.
- [54] 王剑. 华南新元古代裂谷盆地演化: 兼论与 Rodinia 解体的关系[M].北京: 地质出版社, 2000: 80-130.
Wang Jian. *The Evolution of the Neoproterozoic Rift Basin in South China: Also on the Relationship with the Disintegration of Rodinia*[M] Beijing: Geological Publishing House, 2000: 80-130.
- [55] 杨经绥, 史仁灯, 吴才来, 等. 柴达木盆地北缘新元古代蛇绿岩的厘定: 罗迪尼亚大陆裂解的证据? [J]. 地质通报, 2004, 23(9/10): 892-898.
Yang Jingsui, Shi Rendeng, Wu Cailai, et al. Recognition of Neoproterozoic Ophiolite on the Northern Margin of the Qaidam Basin: Evidence of the Breakup of Rodinia? [J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(9/10): 892-898.
- [56] 潘国强, 刘家润, 孔庆友, 等. 徐宿地区震旦纪地质事件及其成因讨论[J]. 高校地质学报, 2000, 6(4): 566-575.
Pan Guoqiang, Liu Jiarun, Kong Qingyou, et al. Study on Sinian Geologic Events in Xuzhou-Suzhou Area and Discussion on Their Origin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2000, 6(4): 566-575.
- [57] Harris N B W, Marzouki F M H, Ali S. The Jabel Sayd Complex, Arabian Shield: Geochemical Constraints on the Origin of Peralkaline and Related Granites[J]. *J Geol Soc Lond*, 1986, 143: 287-295.
- [58] Liegeois N P, Navez J, Hertogen J, et al. Contrasting Origin of Post-Collisional High-K Calc-Alkaline and Shoshonitic Versus Alkaline and Peralkaline Granitoids: The Use of Sliding Normalization[J]. *Lithos*, 1998, 45: 1-28.
- [59] Turner S, Sandiford M, Foden J. Some Geodynamic and Compositional Constraints on "Post-Orogenic" Magmatism[J]. *Geology*, 1992, 20: 931-934.
- [60] 张旗, 潘国强, 李承东, 等. 花岗岩构造环境问题: 关于花岗岩研究的思考之三[J]. 岩石学报, 2007, 23(11): 2683-2698.
Zhang Qi, Pan Guoqiang, Li Chengdong, et al. Are Discrimination Diagrams Always Indicative of Correct Tectonic Settings of Granites? Some Crucial Questions on Granite Study(3)[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(11): 2683-2698.
- [61] 卢成忠, 董传万, 顾明光, 等. 浙江道林山新元古代 A 型花岗岩的发现及其构造意义[J]. 中国地质, 2006, 33(5): 1044-1051.
Lu Chengzhong, Dong Chuanwan, Gu Mingguang, et al. Discovery of the Neoproterozoic Daolinshan A-Type Granite in Zhejiang and Its Tectonic Implications[J]. *Geology in China*, 2006, 33(5): 1044-1051.
- [62] 周宇章, 邢光福, 杨祝良, 等. 浙江诸暨新元古代后造山铝质 A 型花岗岩的厘定[J]. 地球学报, 2006, 27(2): 107-113.
Zhou Yuzhang, Xing Guangfu, Yang Zhuliang, et al. Recognition of Neoproterozoic Post-Orogenic Aluminous A-Type Granite in Zhuji, Zhejiang Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2006, 27(2): 107-113.
- [63] 汪正江, 王剑, 杨平, 等. 上扬子克拉通内新元古代 A 型花岗岩的发现及其地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 2011, 31(2): 1-11.
Wang Zhengjiang, Wang Jian, Yang Ping, et al. The Discovery and Geological Implications of the Neoproterozoic A-Type Granites in the Upper Yangtze Craton [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2011, 31(2): 1-11.
- [64] 张玉顺, 吴玉, 潘家永, 等. 扬子板块西缘黑么花岗岩体的成因与构造意义: 来自锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学的约束[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2020, 39(5): 983-998.
Zhang Yushun, Wu Yu, Pan Jiayong, et al. Petrogenesis and Tectonic Significances of the Heimo Granitic Pluton in the Western Margin of Yangtze Plate: Constraints from SIMS Zircon U-Pb Geochronology and Petrogeochemistry[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2020, 39(5): 983-998.
- [65] 曹正琦, 蔡逸涛, 曾佐勋, 等. 扬子克拉通北缘新元古代 A 型花岗岩的发现及大地构造意义[J]. 地球科学, 2017, 42(6): 957-973.
Cao Zhengqi, Cai Yitao, Zeng Zuoxun, et al. Discovery of Neoproterozoic A-Type Granite in Northern Yangtze Craton and Its Tectonic Significance [J]. *Earth Science*, 2017, 42(6): 957-973.
- [66] Li Z X, Bogdanova S V, Collins A S, et al. Assembly, Configuration, and Break-Up History of Rodinia: A Synthesis[J]. *Precamb Res*, 2008, 160(1/2): 179-210.