



皖浙赣交界莲花山岩体 U-Pb 锆石年龄及其地质意义

刘 欣, 伍 月, 金珊合

中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034

摘 要: 皖浙赣交界莲花山岩体位处扬子板块东南缘, 即扬子板块与华夏板块结合带之东段(江南造山带东段北缘)。该岩体侵入于新元古代末期的上墅组(赣东北), 岩性主要为正长花岗岩及花斑岩, 后期因变质变形作用而发生面理化并具有绿片岩相浅变质矿物组合。地球化学特征指示, 莲花山花岗岩很有可能为形成于大陆边缘后造山环境的 A_2 型花岗岩。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果显示岩体年龄为 878 ± 70 Ma, 为晋宁晚期的产物。

关键词: 江南造山带; 莲花山花岗岩; 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年; 地球化学特征; 岩石成因

U-Pb ZIRCON AGE OF LIANHUASHAN PLUTON IN THE JUNCTION OF ANHUI-ZHEJIANG-JIANGXI PROVINCES: Geological Implication

LIU Xin, WU Yue, JIN Shan-he

Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China

Abstract: The Lianhuashan pluton in the junction of Anhui-Zhejiang-Jiangxi provinces is located in the southeast margin of Yangtze Plate, namely the junction zone of Yangtze Plate and Cathaysia Plate (the northern margin of eastern section of Jiangnan orogenic belt). The pluton intruded into the late Neoproterozoic Shangshu Formation (northeastern Jiangxi), with the lithology of syenogranite and granophyres. In later period, the metamorphic deformation resulted in foliated and greenschist facies epimetamorphic mineral assemblage. The geochemical characteristics indicate that the Lianhuashan granite is probably A_2 type formed in continental margin post-orogenic environment. The zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of the pluton yields the age of 878 ± 70 Ma, which is the product of late Jinning Period.

Key words: Jiangnan orogenic belt; Lianhuashan granite; zircon LA-ICP-MS U-Pb dating; geochemistry; petrogenesis

0 引言

花岗岩作为大陆的标志性岩石, 它是地壳的重要组成部分。花岗岩的构造与变形记录了演化的动力过

程^[1-4]。因此, 通过对花岗岩的岩性特征进行研究, 不仅可以探讨花岗岩变形组构和岩体的地球化学特征, 更能为研究花岗岩与造山带构造演化关系提供新

收稿日期: 2020-12-22; 修回日期: 2021-06-21。编辑: 张哲。

基金项目: 国家自然科学基金项目“华北板块北缘东段法库地区早古生代弧岩浆活动及其构造演化特征”(编号 41902234); 中国地质调查局地质调查项目: “辽东-吉中地区区域地质调查”(编号 DD20190042-02)。

作者简介: 刘欣(1988—), 女, 硕士, 工程师, 从事岩石学、矿物学研究测试工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区北陵大街 26 甲 3 号, E-mail//306541493@qq.com

通信作者: 伍月(1985—), 女, 硕士, 工程师, 从事岩石学、矿物学研究测试工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区北陵大街 26 甲 3 号, E-mail//356392329@qq.com

思路^[5-7]。

皖浙赣一带的中酸性侵入岩广泛分布于瑶里-鄣公山一带,是“江南造山带”皖赣相邻区燕山期花岗岩带重要组成部分。江南造山带是指露于扬子板块与华夏板块之间,主要由一套浅变质、强变形的(中—)新元古代巨厚沉积-火山岩系及时代相当的侵入体所构成的地质构造单元。它呈弧形跨越桂北、黔东南、湘西、湘北、赣北、皖南和浙北的广大区域,制约着中国南方显生宙以来地质构造的演化^[8]。该造山带长期以来备受地质学界关注,一些学者在此区做了相应的工作,分别对不同区域的岩体进行采样研究^[9-12]。在研究方法上,包括构造变形研究、同位素分析、锆石 U-Pb 年代学以及地球化学特征等^[13-14]。王存智等^[15]对下扬子地区花岗岩进行研究,发现了该岩体形成的年龄和地球化学特征,并判断姚村岩体形成原因;周效华等^[16]对江南造山带火山岩进行锆石 SHRIMP 年代学及 Hf 同位素研究,表明该岩体主体形成时期为新元古代早期^[15];Huang 等^[17]对新元古代叶西江和保姆坪岩石进行地球化学、U-Pb 锆石年龄、Lu-Hf 和 Nd 同位素研究,发现该区域为 S 型花岗岩。菅坤坤等^[18]通过研究花岗岩地球化学特征确定了岩石形成环境和构造意义;李献华等^[19]对皖南许村花岗岩进行了高精度的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学和 Nd 同位素测试,以此推断皖南新元古代花岗岩的成因;高林志等^[20]对花岗岩岩石进行 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年研究,还原江南造山带演化机制。

莲花山岩体是该地区较为典型的花岗岩岩体,对于江南造山带乃至整个华南元古宙地质研究有着很重要的意义。然而关于莲花山花岗岩的可靠的年代学数据尚显不足,地球化学特征及成因分析工作也有待完善。因此笔者对此区出露的地层、岩体及构造现象做了详细的野外观察及记录,并采集了相应的岩石样品,以期对莲花山岩体进行系统的岩相学、地球化学及年代学研究,以此为岩体的形成时代、成因类型及构造环境提供依据。

1 区域地质概况

赣浙皖地区位处扬子板块东南缘,即扬子板块与华夏板块结合带之东段,属于中元古代末期造山带乐平-歙县构造混杂岩亚带。该亚带北接扬子地块之修

水-祁门构造单元,南以进源-婺源断裂与万年构造单元、赣东北蛇绿混杂岩亚带、怀玉构造单元、东乡-龙游混杂岩亚带相邻。区域上,该亚带东段歙县一带为皖南伏川蛇绿混杂岩带,从下至上为超镁铁质和镁铁质岩石组合、细碧-角斑岩和硅质岩组合、千枚岩等变质碎屑岩组合等;乐平-婺源一带出露的溪口群为一套富含火山-细碎屑岩建造;赣皖交界区出露溪口群砂泥质复理石建造,岩石变形较强,透入性韧性剪切面理广泛发育。沿宜丰-景德镇-歙县断裂北侧附近,发育一条极为醒目的构造花岗岩带(图 1)。

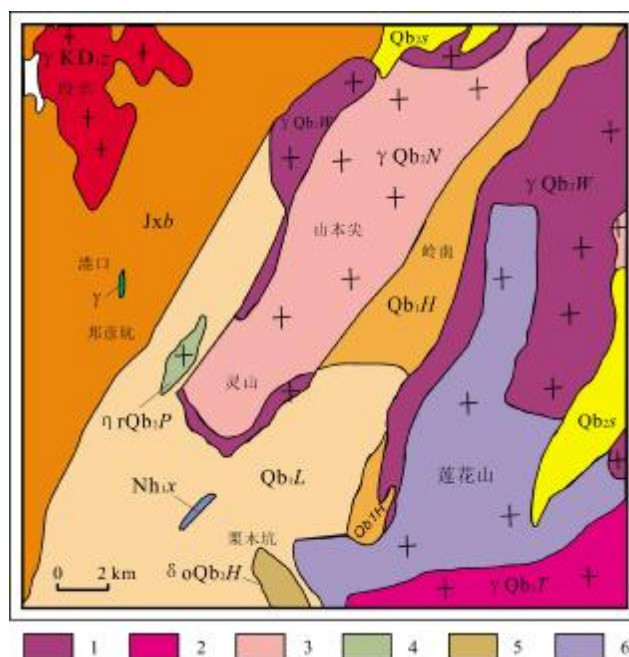


图 1 研究区地质简图

(据文献[7]修改)

Fig. 1 Geological sketch map of the study area

(Modified from Reference [7])

1—齐溪田超单元花岗岩 (Qixitian superunit granite); 2—酸性岩脉 (acidic dyke); 3—灵山花岗岩 (Lingshan granite); 4—邦彦坑岩体 (Bangyankeng pluton); 5—栗木坑岩体 (Limukeng pluton); 6—莲花山花岗岩 (Lianhuashan granite)

研究区的侵入岩主要形成于 2 个时期:新元古代青白口纪和中生代白垩纪。青白口纪的侵入岩有莲花山岩体、灵山岩体,白垩纪的侵入岩有邦彦坑岩体。莲花山岩体分布在研究区东部,岩性为浅灰色中、细粒斑状花岗岩,暗色矿物含量不高,中粒花岗岩较细粒花岗岩片麻理较为明显。灵山岩体分布在研究区中部,岩性与莲花山岩体一致,风化的灵山花岗岩呈土灰色,新

鲜的呈灰白色, 致密坚硬. 邦彦坑岩体呈独立小岩体分布在研究区西部, 主要是花岗质成分, 呈灰白—白色, 块状构造.

2 岩体岩相学特征

通过镜下观察(图 2), 莲花山岩体可分为边部斑状正长花岗岩、核部斑状正长花岗岩和花斑岩 3 类.

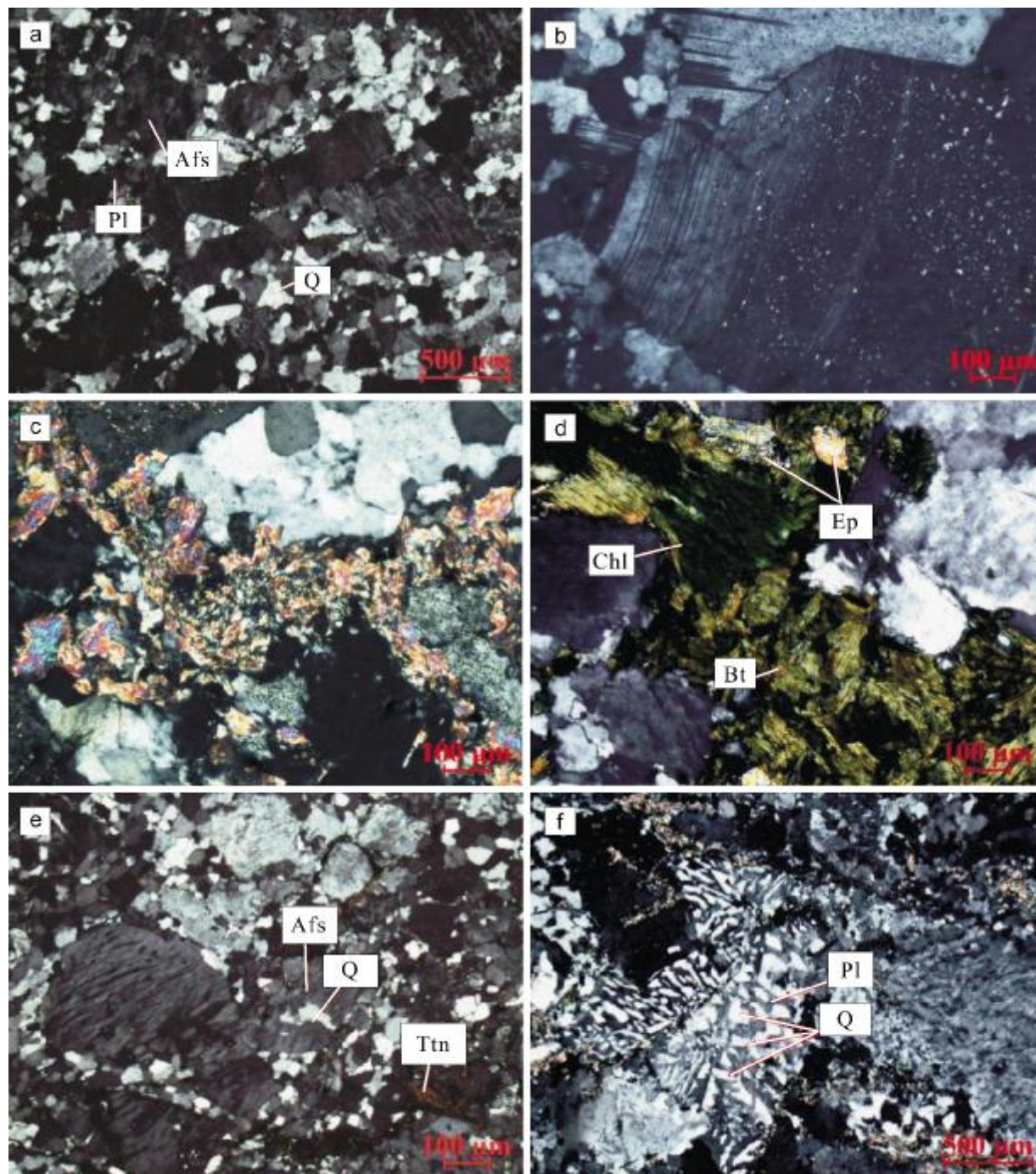


图 2 花岗岩镜下显微结构图

Fig. 2 Microphotographs of granites

a、b—边部斑状二长花岗岩(porphyritic monzogranite on edge); c、d—核部斑状二长花岗岩(porphyritic monzogranite in core); e、f—核部二长花斑岩(monzogranophyre in core); Afs—碱性长石(alkali feldspar); Pl—斜长石(plagioclase); Q—石英(quartz); Ep—绿帘石(epidote); Chl—绿泥石(chlorite); Bt—黑云母(biotite); Ttn—榍石(titanite)

边部斑状正长花岗岩为斑状结构(图 2a、b),斑晶中的矿物大多为细粒结构,基质中的矿物大多为微粒结构.斑晶主要为石英、碱性长石、斜长石,基质主要为石英、斜长石、碱性长石,有少量的角闪石、黑云母.蚀变矿物有绢云母、绿泥石,副矿物有金红石.

核部斑状正长花岗岩为斑状结构(图 2c、d),基质中的矿物大多为中粒结构.斑晶中的主要矿物为石英、斜长石、钾长石,基质主要为石英、斜长石、钾长石,有少量的角闪石、黑云母.蚀变矿物有绢云母、绿泥石、绿帘石.

花斑岩为斑状结构(图 2e、f),斑晶中发育蠕虫结构,基质中发育花斑结构.斑晶矿物有石英、斜长石、钾长石、黑云母,基质主要为石英、斜长石、钾长石,有少量的黑云母和角闪石.蚀变矿物有绢云母、绿泥石,副矿物有榍石.

3 岩体地球化学特征

主量元素测试在湖北省地质实验研究所完成,微量元素和稀土元素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成.

3.1 主量元素

本研究共采集莲花山花岗岩 6 件样品,主量元素测试结果(表 1)显示, SiO₂ 含量为 75.83%~77.48%, Al₂O₃ 为 11.61%~12.57%, Na₂O 为 2.57%~3.43%, K₂O 为 4.73%~6.39%, Na₂O/K₂O= 0.4~0.73, CaO 为 0.2%~0.67%、A/CNK=1.01~1.11. 在 SiO₂-K₂O 图(图 3a)上,显示高钾钙碱性岩石特征.在 A/CNK-A/NK 图解(图

3b)中,所有样品都位于过铝质系列区域,显示弱过铝质花岗岩的成分特点.

表 1 莲花山岩体主量元素分析结果
Table 1 Contents of major elements in Lianhuashan pluton

样品号	HX014-1	HX014-2	HX015-1	HX015-2	HX016-1	HX016-2
SiO ₂	77.15	75.83	76.92	76.37	76.95	77.48
TiO ₂	0.05	0.17	0.18	0.11	0.12	0.09
Al ₂ O ₃	12.44	12.57	11.61	12.37	12.02	11.74
Fe ₂ O ₃	0.9	0.83	0.55	0.66	0.95	0.98
FeO	0.08	0.77	0.85	0.32	0.37	0.22
MgO	0.05	0.19	0.13	0.08	0.05	0.02
MnO	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02
CaO	0.2	0.46	0.47	0.28	0.67	0.48
Na ₂ O	3.27	3.43	2.82	2.57	3.39	3.21
K ₂ O	5.05	4.73	5.29	6.39	4.76	5.08
P ₂ O ₅	0.01	0.02	0.01	<0.01	<0.01	<0.01
烧失量	0.67	0.77	0.99	0.71	0.5	0.51

含量单位:%.

3.2 微量元素

莲花山花岗岩的微量元素测试结果见表 2.微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 4)显示,莲花山花岗岩显示极度亏损 Ba、Sr,整体向右倾斜,富集高场强元素 Zr、Hf、Nb,富集大离子亲石元素 Rb、U、Th,但 Sr 亏损.稀土元素球粒陨石标准化图(图 5)总体上显示轻

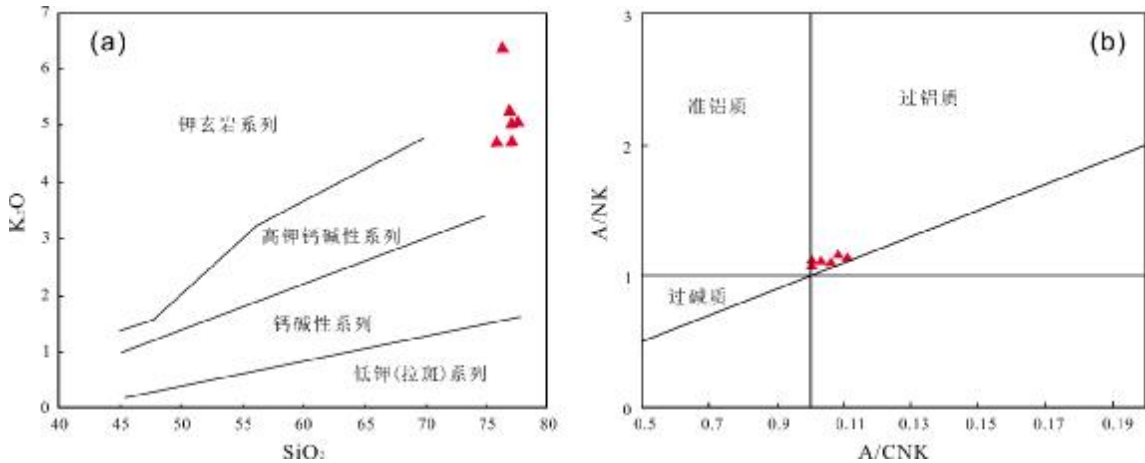


图 3 花岗岩 SiO₂-K₂O 图和 A/CNK-A/NK 图解
Fig. 3 The SiO₂-K₂O and A/CNK-A/NK diagrams of granite

表 2 莲花山岩体微量元素分析结果

Table 2 Contents of trace elements in Lianhuashan pluton						
样品编号	HX014-1	HX014-2	HX015-1	HX015-2	HX016-1	HX016-2
Y	74	68.7	63.7	76.2	68.2	79.7
Zr	76.1	196	159	116	153	158
Nb	14.7	12.1	11.9	13.8	11.5	13.7
Cs	7.38	4.68	5.4	5.88	4.7	7.17
Ba	33.6	839	374	140	677	571
La	11.1	49.1	64.7	44.2	65.8	43.2
Ce	35.5	86	132	98.5	126	77.8
Pr	3.52	11.8	15.7	12.4	14.9	11
Nd	13.7	46.1	61.6	52.1	57.4	44.4
Sm	4.46	10.4	12.6	12.3	11.6	10.5
Eu	0.07	1.21	0.71	0.6	1.04	0.83
Gd	6.36	10.4	12	12.7	11.2	11
LREE/ HREE	0.61	1.88	2.76	1.79	2.52	1.49
Tb	1.51	1.78	1.88	2.13	1.85	1.98
Dy	10.9	10.9	11.2	12.8	11.2	12.7
Ho	2.37	2.24	2.14	2.6	2.29	2.69
Er	7.27	6.51	6.07	7.44	6.73	8.09
Tm	1.15	0.97	0.87	1.05	0.94	1.2
Yb	8.07	6.23	5.61	7.23	6.32	7.93
Lu	1.16	0.9	0.78	1.02	0.91	1.11
Hf	3.83	6.6	5.78	5.3	5.37	6.01
Ta	1.91	1.05	0.84	1.23	0.84	1.27
Pb	36.8	30.2	33.9	47.9	42.7	55.2
Th	12.6	15.4	19.4	25.9	16.6	18.6
U	4.53	2.88	2.89	3.7	3.22	3.78
La _N /Yb _N	0.15	0.71	1.01	0.58	0.96	0.54
Li	6	20.3	24.7	14.6	11.3	3.54
Be	2.71	3.34	1.84	2.14	2.03	3.21
Sc	4.97	6.46	6.01	8.19	7.26	7.22
V	1.67	8.02	3.98	1.77	1.88	0.82
Cr	0.71	3.09	1.29	0.68	2.22	0.41
Co	0.35	1.51	1.2	0.72	0.41	0.18
Ni	1.25	1.95	1.1	5.79	0.63	0.33
Sr	13.9	39.1	22.3	14.3	26.9	24.7
Zn	36.7	55.3	59.2	41.1	68.3	60.6
Ga	18.2	18.1	16.5	18.1	18.6	18.8
Rb	276	185	175	230	147	142
δEu	0.04	0.36	0.18	0.15	0.28	0.24
ΣREE	737.21	1781.42	1322.31	1042.93	1590.38	1414.35

含量单位:10⁻⁶.

稀土富集、重稀土相对亏损的右倾趋势, Eu 明显呈现一个“谷”, δEu= 0.04~0.36, 平均仅 0.21, 表明 Eu 的负异常程度很强烈. 轻、重稀土比值较低, 平均值约为 1.84, La_N/Yb_N 在 0.15~1.01 之间(平均 0.66), 表明轻、重稀土一般富集; 稀土元素总量较高 (737.21×10⁻⁶~1781.42×10⁻⁶), 平均值为 1314.77×10⁻⁶.

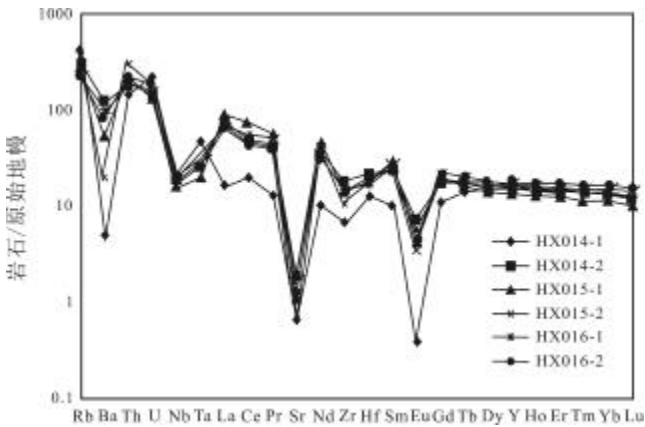


图 4 花岗岩微量元素原始地幔标准化蛛网图

Fig. 4 Primitive mantle-normalized trace element spidergram of granite

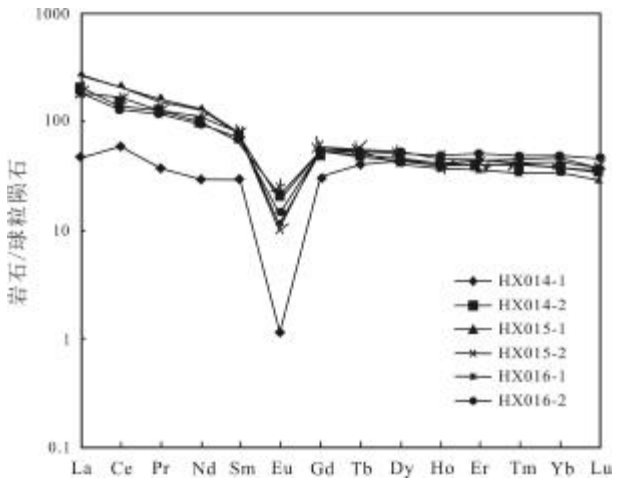


图 5 花岗岩稀土元素球粒陨石标准化分布型式图

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of granite

4 锆石 U-Pb 年代学

4.1 分析方法

从研究区中采集约 5 kg 样品, 用常规方法和流程将锆石分离出来, 在双目镜下挑纯, 用环氧树脂固定制靶, 磨至锆石露出近一半后抛光, 拍摄 CL 图像, 最后利用 LA-ICP-MS 方法测定锆石的 U-Pb 同位素年龄.

测定时采用 6 Hz 的激光频率,75 mJ 的激光强度,24 μm 的激光束斑直径. 以 91500 作为外部标样,用 GJ-1 作内标,在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室测试完成.

4.2 锆石特征及分析

莲花山花岗岩的锆石为自形,颗粒较小,短柱状居

多,长宽比一般 1:1~2:1. 这些锆石也具较高的 U 含量,测试结果见表 3. CL 图片显示锆石晶体内部普遍震荡环带(图 6a),锆石 Th/U 值在 0.31~0.89 之间,大部分大于 0.4,为典型岩浆成因锆石. 这些锆石的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值都在谐和曲线上或附近(图 6b),加权平均年龄为 878±70 Ma.

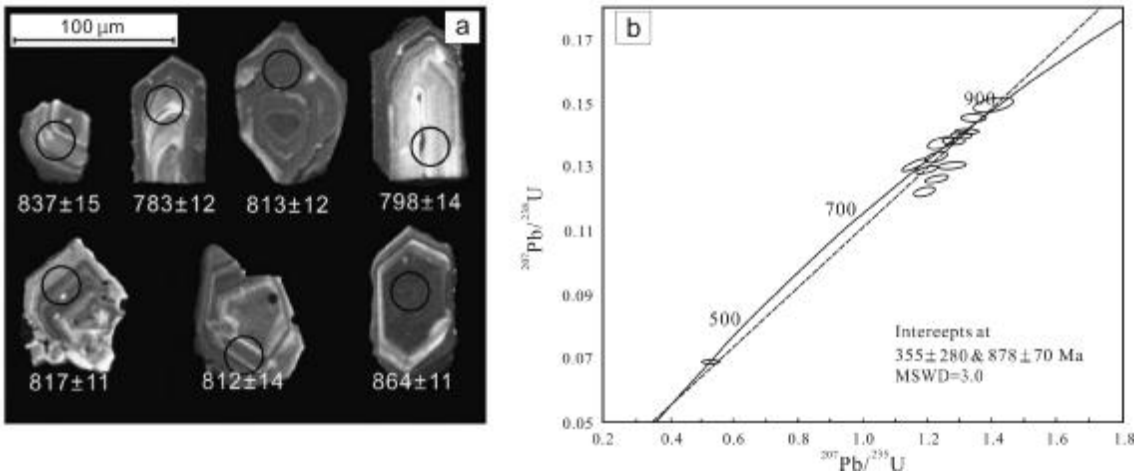


图 6 莲花山斑状二长花岗岩代表性样品锆石阴极发光图像和 U-Pb 谐和图

Fig. 6 CL images of zircons in typical Lianhuashan porphyritic monzogranite samples and U-Pb concordia diagram

表 3 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 分析结果

Table 3 The LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb analysis results

点号	浓度/10 ⁻⁶			Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Pb*	²³² Th	²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
1	154.5	476.8	991.1	0.46	0.0663	0.0015	1.2243	0.0305	0.1330	0.0014	815	48	812	14	805	
2	332.7	1240	1836	0.64	0.0663	0.0013	1.3425	0.0254	0.1460	0.001	817	40	864	11	878	
3	168.5	632.5	962	0.62	0.0674	0.0014	1.3154	0.0273	0.1407	0.0009	850	44	852	12	849	
4	97.9	284.1	653.2	0.41	0.0669	0.0013	1.1985	0.0227	0.1294	0.0012	835	39	800	10	784	
5	85.7	316	582.8	0.51	0.0706	0.0017	1.1941	0.0295	0.1219	0.0011	946	51	798	14	742	
6	179.8	473.9	1132	0.39	0.0646	0.0012	1.2361	0.0248	0.1379	0.0012	761	240	817	11	833	
7	210.1	454.5	1337	0.32	0.0672	0.0011	1.2923	0.0228	0.1386	0.0011	856	35	842	10	837	
8	104.1	281.3	641.6	0.41	0.0668	0.0014	1.2880	0.0258	0.1393	0.0010	831	43	840	11	840	
9	178.2	367.4	1131	0.31	0.0675	0.0012	1.3000	0.0240	0.1388	0.0010	854	42	846	11	838	
10	21.8	105.5	111.7	0.89	0.0683	0.0024	1.4042	0.0475	0.1496	0.0017	876	125	891	20	899	
11	51.4	140.7	333.4	0.4	0.0657	0.0016	1.1963	0.0287	0.1314	0.0010	796	55	799	13	796	
12	269.5	1141	1778	0.57	0.0704	0.0015	1.2269	0.0257	0.1260	0.0010	939	44	813	12	765	
13	120.9	278	794.5	0.33	0.0708	0.0018	1.2803	0.0332	0.1303	0.0011	954	55	837	15	790	
14	53	195.5	336.2	0.54	0.0644	0.0014	1.1616	0.0257	0.1304	0.0010	767	245	783	12	790	

5 构造意义

莲花山花岗岩为具有似片麻状构造的斑状二长花岗岩及二长花斑岩,其主要矿物为石英、斜长石、钾长石(条纹长石),次要矿物有碱性角闪石、黑云母,偶尔会看到绿帘石,副矿物有磁铁矿、榍石、锆石等。根据矿物特征和主量、微量元素地球化学特征,莲花山花岗岩属于 A 型花岗岩^[21-23](图 7)。

根据样品地球化学特征,样品中大部分的大离子亲石元素与高场强元素同时富集,且蛛网图呈一右倾曲线,这与板内花岗岩的地球化学特征相一致,莲花山花岗岩可能为板内花岗岩^[24]。另外根据花岗岩构造环境的判别图(图 8),样品点均投在 A₂ 类型区域内,并且位于造山期后 A 型花岗岩中,因此可以判断莲花山花岗岩可能形成于后造山环境。

A 型花岗岩是由地幔玄武岩岩浆演化或玄武岩浆上升后,受地壳不同程度混染或亏损地壳熔融的产物^[25]。据薛怀民等^[8]研究,皖南歙县缝合带完全闭合后,残余的部分岩浆沿缝合带侵位,使得挤压应力松

弛,江南造山带逐渐形成,先前发生过熔融的加厚地壳物质再次发生部分熔融,并可能混合了部分来自亏损地幔的岩浆,经高度演化最后形成了莲花山岩体。因此,莲花山花岗岩可能是在江南造山带晚期或后期形成,为晚造山或后造山阶段产物。

6 结论

1) 莲花山花岗岩可分为岩体边部斑状二长花岗岩、岩体核部斑状二长花岗岩和二长花斑岩 3 类。

2) 地球化学数据显示莲花山花岗岩属于钙碱性花岗岩,具有高钾富碱低钙的特征。高场强元素 Zr、Hf、Nb 含量偏高,大离子亲石元素 Rb、U、Th 含量高,但 Sr 含量低。

3) 莲花山花岗岩的结晶年龄为 878 ± 70 Ma。

4) 莲花山岩体在江南造山带晚期或后期形成,属 A₂ 型花岗岩,几乎全部形成于主体上的伸展体制或挤压、剪切体制下派生的局部拉张环境。

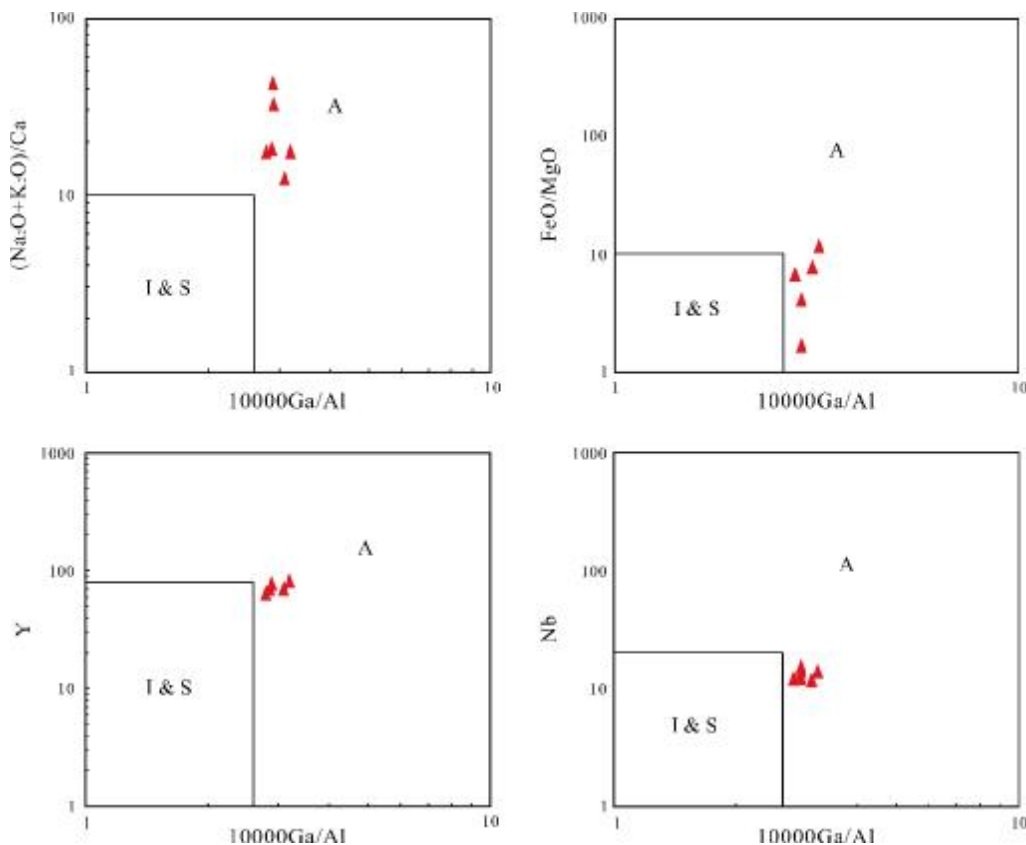


图 7 岩石成因类型判别图

Fig. 7 The genetic discrimination diagrams of granite

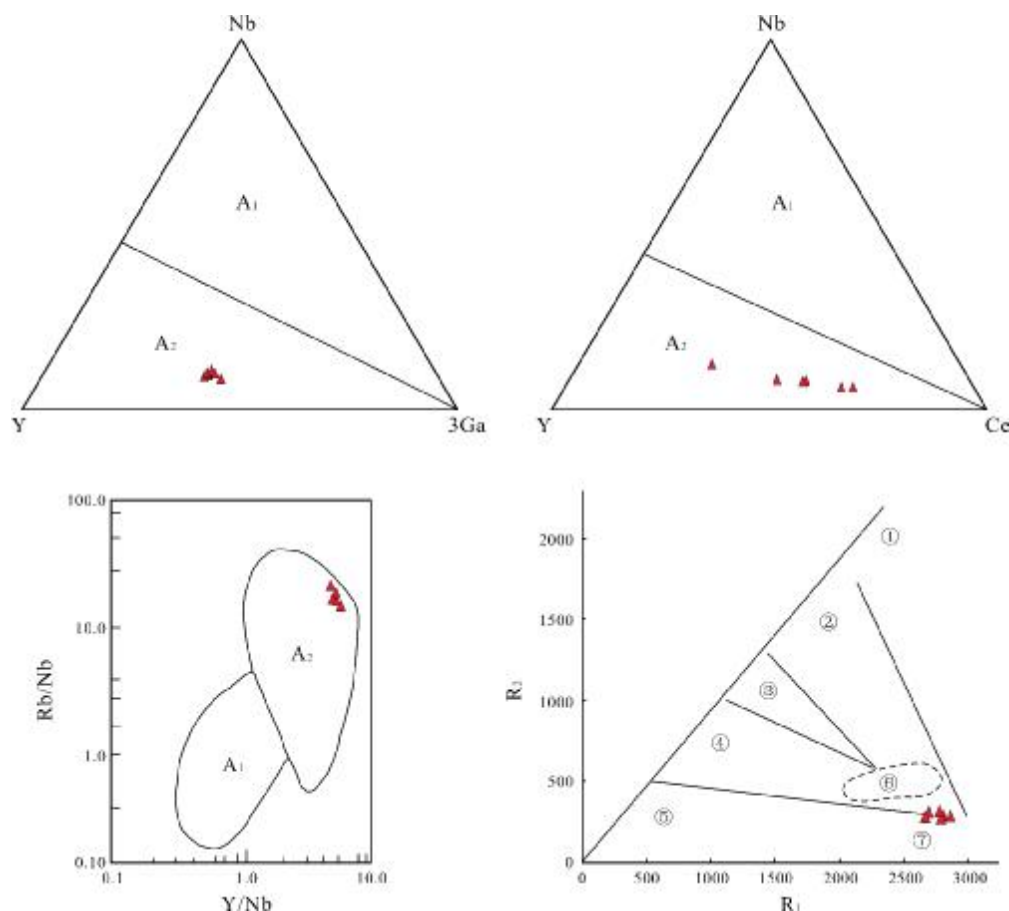


图 8 花岗岩构造环境判别图

Fig. 8 The tectonic discrimination diagrams of granite

- ①—地幔斜长花岗岩(mantle-sourced plagioclase granite); ②—破坏性活动板块边缘(板块碰撞前)花岗岩(destructive active plate margin granite); ③—板块碰撞后隆起花岗岩(post-collisional uplift granite); ④—晚造山期花岗岩(late-orogenic granite); ⑤—非造山期 A 型花岗岩(anorogenic A-type granite); ⑥—同碰撞(S 型)花岗岩(syn-collisional S-type granite); ⑦—造山期后 A 型花岗岩(postorogenic A-type granite)

参考文献(References):

- [1] Zafar T, Rehman H U, Mahar M A, et al. A critical review on petrogenetic, metallogenic and geodynamic implications of granitic rocks exposed in north and east China: New insights from apatite geochemistry[J]. *Journal of Geodynamics*, 2020, 136: 101723.
- [2] Yin C Q, Lin S F, Davis D W, et al. Tectonic evolution of the southeastern margin of the Yangtze Block: Constraints from SHRIMP U-Pb and LA-ICP-MS Hf isotopic studies of zircon from the eastern Jiangnan orogenic belt and implications for the tectonic interpretation of South China[J]. *Precambrian Research*, 2013, 236: 145–156.
- [3] 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 F Y, Li X H, Yang J H, et al. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(6): 1217–1238.
- [4] 肖庆辉, 邱瑞照, 邢作云, 等. 花岗岩成因研究前沿的认识[J]. *地质论评*, 2007, 53(S1): 17–27.
- Xiao Q H, Qiu R Z, Xing Z Y, et al. Major frontiers on studies of granite formation[J]. *Geological Review*, 2007, 53(S1): 17–27.
- [5] Liu C H, Zhao G C, Liu F L, et al. Coexistence of A- and I-type granites in the Lüliang complex: Tectonic implications for the middle Paleoproterozoic Trans-North China Orogen, North China Craton[J]. *Lithos*, 2021, 380–381: 105875.
- [6] 耿元生, 旷红伟, 杜利林, 等. 华北、华南、塔里木三大陆块中-新元古代岩浆岩的特征及其地质对比意义[J]. *岩石学报*, 2020, 36(8): 2276–2312.
- Geng Y S, Kuang H W, Du L L, et al. The characteristics of Mesoproterozoic magmatic rocks in North China, South China and Tarim blocks and their significance of geological correlation[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(8): 2276–2312.
- [7] 吴荣新, 郑永飞, 吴元保. 皖南石耳山新元古代花岗岩锆石 U-Pb 定年以及元素和氧同位素地球化学研究[J]. *高校地质学报*, 2005, 11(3): 364–382.
- Wu R X, Zheng Y F, Wu Y B. Zircon U-Pb Age, Element and oxygen isotope geochemistry of Neoproterozoic granites at Shiershan in

- south Anhui Province [J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11(3): 364–382.
- [8] 薛怀民, 马芳, 宋永勤, 等. 江南造山带东段新元古代花岗岩组合的年代学和地球化学: 对扬子与华夏地块拼合时间与过程的约束[J]. 岩石学报, 2010, 26(11): 3215–3244.
- Xue H M, Ma F, Song Y Q, et al. Geochronology and geochemistry of the Neoproterozoic granitoid association from eastern segment of the Jiangnan orogen, China: Constraints on the timing and process of amalgamation between the Yangtze and Cathaysia blocks [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(11): 3215–3244.
- [9] 张继彪, 刘燕学, 丁孝忠, 等. 江南造山带东段新元古代登山群年代学及大地构造意义[J]. 地球科学, 2020, 45(6): 2011–2029.
- Zhang J B, Liu Y X, Ding X Z, et al. Geochronology of the Dengshan Group in the eastern Jiangnan Orogen, and its tectonic significance [J]. Earth Science, 2020, 45(6): 2011–2029.
- [10] 段政, 廖圣兵, 褚平利, 等. 江南造山带东段新元古代九岭复式岩体锆石 U-Pb 年代学及构造意义[J]. 中国地质, 2019, 46(3): 493–516.
- Duan Z, Liao S B, Chu P L, et al. Zircon U-Pb ages of the Neoproterozoic Jiuling complex granitoid in the eastern segment of the Jiangnan orogen and its tectonic significance [J]. Geology in China, 2019, 46(3): 493–516.
- [11] 王阳阳, 宋传中, 李加好, 等. 江南造山带石耳山新元古代花岗岩的构造变形、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质论评, 2019, 65(1): 85–102.
- Wang Y Y, Song C Z, Li J H, et al. Deformational characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of granites at Shiershan in the Jiangnan orogen and their geological significance [J]. Geological Review, 2019, 65(1): 85–102.
- [12] 王晓虎, 张文高, 陈正乐, 等. 华南沿海莲花山断裂带控矿构造变形时限: 来自锆石 U-Pb 年龄与地层时代的约束[J]. 中国地质, 2020, 47(4): 985–997.
- Wang X H, Zhang W G, Chen Z L, et al. Deformation time limit of ore-controlling structures in Lianhuashan fault zone along the South China coast: Constraints from zircon U-Pb age and stratigraphic age [J]. Geology in China, 2020, 47(4): 985–997.
- [13] 梁科伟, 李成禄, 张立东, 等. 大兴安岭诺敏地区二叠纪花岗岩的地球化学特征及地质意义[J]. 地质与资源, 2012, 21(2): 181–187.
- Liang K W, Li C L, Zhang L D, et al. Geochemistry and its geological implication of the Permian granite in Nuomin, Daxinganling region [J]. Geology and Resources, 2012, 21(2): 181–187.
- [14] 张志辉, 张达, 贺晓龙, 等. 江西九岭杂岩中黑云母花岗岩长岩锆石 U-Pb 年龄及其对扬子和华夏板块碰撞拼合时间的限定[J/OL]. 中国地质, 1–26. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=DIZI20191209000&uniplatform=NZKPT&v=9KB2W89RffONNdAGuArAhMUL4awEoanmNlde1cPqq0yPaLzEirdILjJ8yCws0jbT>, 2021–06–07.
- Zhang Z H, Zhang D, He X L, et al. Biotite granodiorite zircon U-Pb age in Jiuling complex, Jiangxi Province and its limitation on the collision and splicing time of the Yangtze and Huaxia Plates [J/OL]. Geology in China: 1–26. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=DIZI20191209000&uniplatform=NZKPT&v=9KB2W89RffONNdAGuArAhMUL4awEoanmNlde1cPqq0yPaLzEirdILjJ8yCws0jbT>, 2021–06–07.
- [15] 王存智, 黄志忠, 赵希林, 等. 下扬子地区姚村 A 型花岗岩年代学、地球化学特征及岩石成因[J]. 中国地质, 2021, 48(2): 549–563.
- Wang C Z, Huang Z Z, Zhao X L, et al. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of early Cretaceous Yaocun A-type granite in the lower Yangtze region [J]. Geology in China, 2021, 48(2): 549–563.
- [16] 周效华, 陈荣, 张炜, 等. 江南造山带九岭南缘宜丰岩组火山岩锆石 SHRIMP 年代学及 Hf 同位素特征[J]. 地质学报, 2019, 93(5): 1069–1080.
- Zhou X H, Chen R, Zhang W, et al. Zircon SHRIMP geochronology and Hf isotopic characteristics of volcanic rocks from the Yifeng Formation in the southern margin of the Jiuling uplift in the Jiangnan orogen [J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(5): 1069–1080.
- [17] Huang S F, Wang W, Pandit M K, et al. Neoproterozoic S-type granites in the western Jiangnan Orogenic Belt, South China: Implications for petrogenesis and geodynamic significance [J]. Lithos, 2019, 342–343: 45–58.
- [18] 菅坤坤, 何元方, 赵端昌, 等. 东昆仑中段灶火沟花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. 地球科学与环境学报, 2020, 42(5): 603–621.
- Jian K K, He Y F, Zhao R C, et al. Zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of Zaohegou granitoids in the middle part of East Kunlun, China and their tectonic significance [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2020, 42(5): 603–621.
- [19] 李献华, 李正祥, 周汉文, 等. 皖南新元古代花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学、元素地球化学和 Nd 同位素研究[J]. 地质论评, 2002, 48(S1): 8–16.
- Li X H, Li Z X, Zhou H W, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronological, geochemical and Nd isotopic study of the Neoproterozoic granitoids in southern Anhui [J]. Geological Review, 2002, 48(S1): 8–16.
- [20] 高林志, 杨明桂, 丁孝忠, 等. 华南双桥山群和河上镇群凝灰岩中的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄——对江南新元古代造山带演化的制约[J]. 地质通报, 2008, 27(10): 1744–1751.
- Gao L Z, Yang M G, Ding X Z, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating of tuff in the Shuangqiaoshan and Heshangzhen groups in South China: Constraints on the evolution of the Jiangnan Neoproterozoic orogenic belt [J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(10): 1744–1751.

(下转第 682 页/Continued on Page 682)

- 构造带形成机制[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(3): 275-283.
- Sun Y H, Chen Y B, Sun J G, et al. Evolutionary sequence of faults and the formation of inversion structural belts in the northern Songliao Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(3): 275-283.
- [12] 张雷, 王英民, 李树青, 等. 松辽盆地北部四方台组—明水组高精度层序地层特征与有利区带预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(6): 1679-1688.
- Zhang L, Wang Y M, Li S Q, et al. High-resolution sequence stratigraphic characteristic and favorable hydrocarbon accumulation prediction of Sifangtai to Mingshui formation in the north of Songliao Basin [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 40(6): 1679-1688.
- [13] 邢作昌, 秦明宽, 李研, 等. 松辽盆地东北缘晚白垩世地层结构、沉积充填及铀矿找矿方向[J]. 中国地质, 2021, 48(4): 1225-1238.
- Xing Z C, Qin M K, Li Y, et al. Stratigraphic architecture, sedimentary filling and uranium prospecting of Upper Cretaceous strata, northeastern Songliao Basin[J]. Geology in China, 2021, 48(4): 1225-1238.
- [14] 程日辉, 王国栋, 王璞珺, 等. 松科 1 井北孔四方台组—明水组沉积微相及其沉积环境演化[J]. 地学前缘, 2009, 16(6): 85-95.
- Cheng R H, Wang G D, Wang P J, et al. Uppermost cretaceous sediments: Sedimentary microfacies and sedimentary environment evolution of Sifangtai Formation and Mingshui Formation in SK- I (n) [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(6): 85-95.
- [15] 万涛, 刘招君, 胡菲, 等. 松辽盆地北部上白垩统四方台组河流相层序沉积特征[J]. 大庆石油地质与开发, 2018, 37(5): 1-7.
- Wan T, Liu Z J, Hu F, et al. Sedimentary characteristics of the fluvial sequence of upper cretaceous Sifangtai Formation in north Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2008, 37(5): 1-7.
- [16] 封志兵, 聂逢君, 严兆彬, 等. 松辽盆地西部斜坡铀成矿条件及聚铀模式[J]. 大庆石油地质与开发, 2013, 32(4): 36-41.
- Feng Z B, Nie F J, Yan Z B, et al. Mineralizing conditions and metallogenic model of uranium in west slope of Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2013, 32(4): 36-41.
- [17] 赵忠华. 中国北东部中生代盆地地浸砂岩型铀矿成矿条件及找矿方向[J]. 地质与资源, 2003, 12(1): 36-41, 60.
- Zhao Z H. Metallogenic conditions and prospecting direction for in-situ leachable sandstone-type uranium deposits in the meso-cenozoic basins of northeast China[J]. Geology and Resources, 2003, 12(1): 36-41, 60.
- [18] 陈路路, 聂逢君, 严兆彬. 松辽盆地西部斜坡带四方台组铀成矿条件分析[J]. 世界核地质科学, 2013, 30(2): 70-78.
- Chen L L, Nie F J, Yan Z B. Analysis on uranium metallogenic conditions of Sifangtai Formation in western slope of Songliao Basin [J]. World Nuclear Geoscience, 2013, 30(2): 70-78.
- [19] 王黎明, 韩志滨, 侯晓光. 松辽盆地协尔苏地区泉头组一段砂体及铀矿化特征分析[J]. 地质与资源, 2016, 25(6): 543-549.
- Wang L M, Han Z B, Hou X G. Characteristics of uranium mineralization of the sandstone of the first member, Quantou formation, in Xiersu depression, Songliao Basin [J]. Geology and Resources, 2016, 25(6): 543-549.
- [20] 马文娟. 松辽盆地北部姚家组沉积特征及铀成矿条件[J]. 地质与资源, 2013, 22(2): 81-85.
- Ma W J. Sedimentary characteristics and uranium mineralization of the Yaojia formation in northern Songliao Basin [J]. Geology and Resources, 2013, 22(2): 81-85.
- [21] 赵忠华, 白景萍, 赖天功. 松辽盆地北部反转构造与砂岩型铀矿成矿作用[J]. 铀矿地质, 2018, 34(5): 274-279.
- Zhao Z H, Bai J P, Lai T G. Reversal structure and its relation to metallization of sandstone type uranium deposit in northern Songliao Basin [J]. Uranium Geology, 2018, 34(5): 274-279.

(上接第 674 页/Continued from Page 674)

- [21] 马莫. 花岗岩岩石学与花岗岩问题[M]. 北京: 地质出版社, 1979: 1-255.
- Marmo V. Granite petrology and the granite problem [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1979: 1-255.
- [22] 苏玉平, 唐红峰. 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, 2005, 24(3): 245-251.
- Su Y P, Tang H F. Trace element geochemistry of A-type granites[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2005, 24(3): 245-251.
- [23] 许保良, 阎国翰, 张臣, 等. A 型花岗岩的岩石学亚类及其物质来源[J]. 地学前缘, 1998, 5(3): 113-124.
- Xu B L, Yan G H, Zhang C, et al. Petrological subdivision and source material of A-type granites [J]. Earth Science Frontiers, 1998, 5(3): 113-124.
- [24] Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 58(1): 63-81.
- [25] 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.