

江苏赣榆县石桥浅变质岩地球化学和锆石 U-Pb 年龄

袁亚娟^{1,3*}, 夏斌^{1,2}, 张玉泉¹, 夏连泽², 李贺^{1,3}

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 2. 中山大学 海洋学院, 广东 广州 510275; 3. 中国科学院 大学, 北京 100049)

摘要: 对石桥浅变质岩进行了综合研究。结果表明: (1) 岩石化学成分富碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 6.39%~10.65%)、高钾、贫钠($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}=0.03\sim 0.05$); (2) 微量元素富集 Rb、Ba、Th、U 等大离子亲石元素和富 Pb, 贫 Sr; (3) 稀土元素含量为 130.89~232.80 $\mu\text{g/g}$, 轻稀土元素富集(LREE/HREE=7.92~14.84), Eu 负异常不明显($\delta\text{Eu}=0.73\sim 0.91$), 模式曲线向右倾斜(La/Yb=8.4~21.3); (4) 锆石定年表明其时代属于寒武纪(554 Ma); (5) 变质复合锆石的老核, 其年龄值较多的是在新太古代(2577~2502 Ma)至古元古代(2500~1600 Ma)。变质复合锆石的新壳, 其年龄分别为 2483、2370、2211、778 和 554 Ma, 表明继承锆石在其源区曾分别经过变质作用。前述特征均不同于大别-苏鲁超高压变质带的副片麻岩, 暗示石桥浅变质岩的成因非原地, 而是异地(飞来峰)。

关键词: 锆石 U-Pb 年龄; 元素地球化学; 浅变质岩; 石桥; 赣榆县; 江苏省

中图分类号: P597; P58 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2013)05-0499-08

Geochemical characteristics and zircon U-Pb ages of low-grade metamorphic rocks in Shiqiao region, Ganyu County, Jiangsu Province

YUAN Ya-juan^{1,3*}, XIA Bin^{1,2}, ZHANG Yu-quan¹, XIA Lian-ze² and LI He^{1,3}

1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Marine College of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The low-grade metamorphic rocks in Shiqiao area are characterized by alkali-rich ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} = 6.39\% \sim 10.65\%$), high K_2O ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0.03 \sim 0.05$) and low Na_2O . They are further characterized by enrichment in Rb, Ba, Th, Pb and U and depletion in Sr. The concentration of rare earth elements (REE) is in the range 130.89~232.80 $\mu\text{g/g}$. These rocks are enriched in light REE (LREE/HREE = 7.92~14.84) and lack of obvious Eu negative anomaly ($\delta\text{Eu} = 0.73 \sim 0.91$). The new shells of metamorphic composite zircon range in age from Proterozoic era (2483 Ma, 2370 Ma, 2211 Ma and 778 Ma) to Paleozoic era (554 Ma). However, the existence of Paleozoic-age indicates the low-grade metamorphic rock within Shiqiao area belongs to the early Paleozoic (554 Ma). The U-Pb ages of inherited zircons are concentrated at Mesoarchean, Neoproterozoic, Paleoproterozoic. The different age within the new shells of metamorphic composite zircon shows that the inherited zircons were subjected to metamorphism in the source area. As the preceding feature are different from the paragneiss within Dabie-Sulu ultrahigh pressure metamorphic belt, the petrogenesis of the low grade metamorphic rock is a klippe.

Key words: zircon U-Pb ages; element geochemistry; low-grade metamorphic rocks; Shiqiao; Ganyu County; Jiangsu Province

收稿日期(Received): 2012-08-15; 改回日期(Revised): 2012-12-26; 接受日期(Accepted): 2013-01-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB219401); 中国科学院知识创新项目(0734021)

作者简介: 袁亚娟(1986-), 女, 博士研究生, 构造地质专业。

* 通讯作者(Corresponding author): YUAN Ya-juan, E-mail: yyjli924@163.com; Tel: +86-20-85290025

YUAN Ya-juan et al.: Geochemical characteristics of low-grade metamorphic rocks in Shiqiao region

0 引言

石桥浅变质岩,处于苏北-胶南地块超高压变质带腹地(“东海群”或“胶南群”),限于北界五莲-烟台断裂、南界嘉山-响水断裂之间,分布在赣榆县石桥镇南边(35°02.32'N, 119°10.32'E)和保存原始结构的浅变质沉积岩系。在“苏北变质岩”专题研究中,将该套浅变质岩从深变质岩(东海群)中分出,建立“石桥群”,时代定为早元古代^[1]。随后又定为晚元古代^[2]、震旦纪^[3]和晚元古代末期^[4]等。董树文等把大片超高压变质带分布区的腹地,赣榆县北苏鲁两省交界附近出露面积很小的浅变质沉积岩系厘定为“石桥构造窗”^[5]。在后来的研究者又确认为“沉积盖层”^[4]、“飞来峰”^[6]、“加积楔”^[7-8]和来自华北板块的残片^[9]等。本研究拟在前人工作的基础上,开展石桥浅变质岩元素地球化学和锆石 U-Pb 定年研究,旨在对比其与苏鲁超高压带中超高压变质岩的地球化学特征,从而进一步确定石桥浅变质岩的原岩成岩环境和时代。

1 地质简况

研究区位于华南板块与华北板块的结合部位,发育在五莲-威海断裂和沐阳-连云港断裂之间的超高压变质带中(图 1),为典型的三叠纪高压-超高压变质岩组合,宽约 160 km,主要由深变质岩“东海群”和分布在东海群之内的浅变质岩“石桥群”组成。前者包括片麻岩、榴辉岩和混合岩,其中榴辉岩中发育柯石英和金刚石,代表了超高压变质($t = 740 \sim 840$; $p > 2.8$ GPa)^[9-11]。后者主要为灰-灰白色、深灰色的互层状浅变质碎屑岩:变质砂砾岩、变质细砾岩、板岩、千枚岩、片岩、石英岩和变质火山碎屑岩等。从石桥镇南侧浅变质岩采石场(35°02.574'N, 119°10.542'E: 145° 3')向西到朱官庄采石场(35°02.397'N, 119°08.195'E: 105° 12'),再向西到石桥镇西南片麻岩采石场(35°02.915'N, 119°07.595'E: 130° 12')等地,岩层平直,产状平缓,在采坑壁可见 20 cm 厚的细砾岩层之上是 0.8 cm 厚的黑板岩(图 2a),其中细砾岩

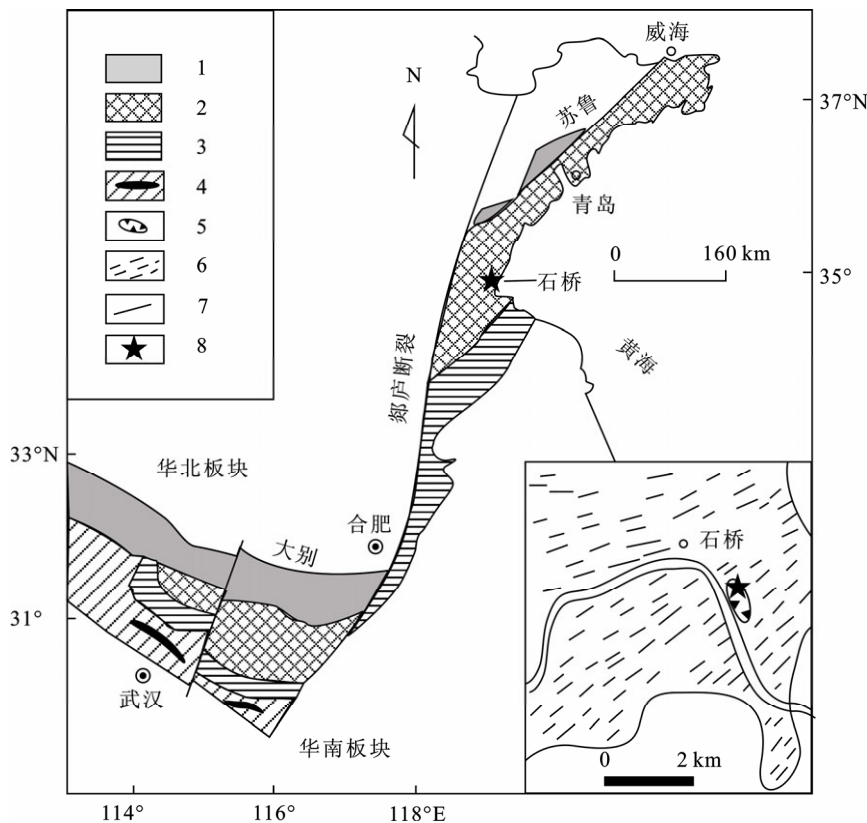


图 1 石桥地区地质简图(据董树文等^[5]略加修改)

Fig.1 Simplified geological map of Shiqiao area (modified after Dong *et al.*^[5])

1□低级变质带; 2□超高压单元; 3□高压带; 4□高压蓝片岩带; 5□石桥构造窗; 6□东海群; 7□断裂; 8□采样点
1□low grade metamorphic belt; 2□ultra-high-pressure belt; 3□high-pressure belt; 4□high-pressure blueschist belt;
5□Shiqiao window; 6□Donghai group; 7□fault; 8□sampling location

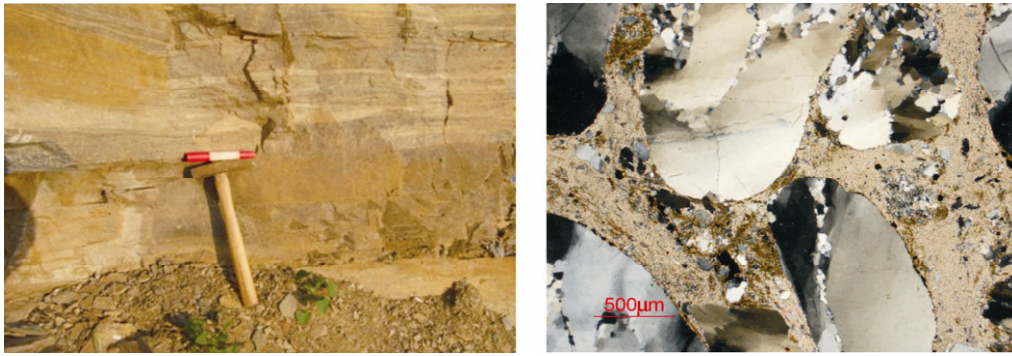


图 2 石桥地区野外照片(a)和显微照片(b)

Fig.2 Outcrop image and photomicrograph in the Shiqiao region

中石英砾石磨圆度较好(图 2b)。从前述的采石场所见岩层产状,说明石桥浅变质岩处在深变质岩(片麻岩)之上。石桥浅变质岩与周边超高压变质岩呈构造接触^[12]。样品均采自石桥镇南侧采石场(35°02.574'N, 119°10.542'E)。

2 元素地球化学特征

岩石化学分析所用仪器为中国科学院广州地球化学研究所的 Varian Vista-PRO 型 ICP-AES (CCD 全谱直读 ICP-AES), 所有氧化物分析误差(RSD)小于 5%。微量元素包括稀土元素, 在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室用 PE-Elan 6000 型 ICP-MS 测试, 元素误差小于 10%。岩石化学和微量元素(含稀土元素)分析结果见表 1。

2.1 岩石化学

石桥浅变质岩(板岩、片岩和千枚岩)岩石化学分析结果见表 1。表 1 中本文分析结果与文献[8]基本一致。其主要成分含量变化范围: SiO₂ 52.23%~75.70%, Al₂O₃ 9.26%~20.56%, Na₂O 0.26%~0.23%, K₂O 6.08%~10.22%, CaO 0.21%~0.35%等, 表明石桥浅变质岩化学成分富碱(Na₂O+K₂O=6.39%~10.65%)、高钾、贫钠(Na₂O/K₂O=0.03~0.05)等, 不同于大别-苏鲁超高压变质带的副片麻岩, 该副片麻岩在岩石化学成分上富钠(Na₂O 4.13%~5.30%)、低钾(Na₂O/K₂O=1.42~2.86)等^[14]。

2.2 微量元素(包括稀土元素)

在微量元素组成上, 本研究 and 文献[13]的样品均富集 Rb、Ba、Th、U 等大离子亲石元素和富 Pb, 贫 Sr。在原始地幔标准化蛛网图上(图 3), Sr 呈现“V”

型谷。稀土元素含量变化范围为 130.89~232.80 μg/g, 轻稀土元素比较富集(LREE/HREE 为 7.92~14.84), Eu 负异常不明显($\delta\text{Eu}=0.73\sim0.91$), 稀土元素分布模式为右倾斜(La/Yb=8~21)(图 4)。与大别-苏鲁超高压变质带的副片麻岩明显不同^[14]。

3 锆石 U-Pb 年龄

3.1 锆石分选

为了尽量排除交叉混样, 采用以下流程^[16]分选锆石: 把 0.5 kg 左右的样品破碎成约 1 cm³ 的小块, 放入直径为 20 cm 的不锈钢钵中, 在 XZW100 型振动磨样机中研磨 3~5 s 后取出, 此过程反复进行到样品全部通过 0.3 mm 的孔径筛, 洗去粉尘, 用铝制淘沙盘富集重矿物, 再通过磁选和电磁选, 将剩余非电磁部分再淘洗获得锆石精矿, 最后在双目镜下挑选出用于定年的锆石。

3.2 分析方法和精度

锆石 LA-ICPMS 分析在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成。将锆石与标样(TEM=417 Ma)置于玻璃板上, 用环氧树脂固制定成样品靶, 然后磨至约一半, 使锆石内部暴露, 暴露出锆石的中心面, 喷碳沫照阴极(CL)发光相。再擦掉碳沫, 即可进行 LA-ICPMS U、Pb 含量测定, 采用单点剥蚀的方法(激光剥蚀斑束直径为 31 μm, 频率为 8 Hz)。详细的实验流程和数据处理见文献[17~18]。用实测 ²⁰⁴Pb 校正锆石中的普通 Pb。单个数据点的误差均为 1σ, 年龄大于 800 Ma 的数据点采用年龄为 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄, 年龄小于 800 Ma 的数据点采用年龄为 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄, 其加权平均值为 95% 的置信度。

表1 石桥浅变质岩主元素(%)和微量元素($\mu\text{g/g}$)分析结果

Table 1 Representative composition of major and trace element contents in low-grade metamorphic rocks within the Shiqiao region

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
样号	SQ6-1	SQ6-2	SQ6-3	SQ6-4	00SQ-08	00SQ-09	C4-75-14	C6-78-17
岩性	板岩	片岩	片岩	千枚岩	千枚岩	杂砂岩	副片麻岩	副片麻岩
SiO ₂	52.23	73.28	76.91	71.31	60.49	75.50	71.42	75.82
TiO ₂	0.92	0.80	0.91	0.51	0.93	1.21	0.47	0.16
Al ₂ O ₃	20.56	11.55	9.32	13.03	16.18	9.26	13.00	12.66
FeO	8.58	2.31	3.01	3.33	7.37	4.53	3.92	2.02
MnO	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.03	0.10	0.06
MgO	2.49	0.70	0.87	1.07	1.79	1.12	1.20	0.38
CaO	0.21	0.24	0.35	0.26	0.33	0.28	2.46	1.37
Na ₂ O	0.43	0.37	0.31	0.26	0.48	0.35	4.13	5.30
K ₂ O	10.22	8.33	6.08	7.93	10.02	6.02	2.90	1.85
P ₂ O ₅	0.22	0.21	0.28	0.20	0.23	0.17	0.14	0.10
LOI	3.11	0.95	0.91	1.53	1.83	1.21	0.52	0.26
Total	99.00	98.74	98.87	99.44	99.66	99.68	100.26	99.89
Na ₂ O + K ₂ O	10.65	8.70	6.39	8.19	10.50	6.37	7.03	7.15
Na ₂ O/K ₂ O	0.04	0.04	0.05	0.03	0.04	0.05	1.42	2.86
Sc	21.80	5.86	6.54	7.10	12.00	5.60	15.4	7.73
V	121.00	32.60	49.30	37.30	64.40	43.30	70.7	11.7
Cr	163.00	48.40	65.20	58.60	89.60	40.80	126	116
Co	22.50	4.28	9.98	9.57	15.90	11.00	8.77	2.61
Ni	74.80	20.00	33.80	29.40	54.50	24.60	34.7	8.49
Rb	237.00	127.00	115.00	137.00	221.70	128.40	104	22.0
Sr	108.00	271.00	163.00	146.00	235.00	148.00	120	53.1
Ba	886.00	1830.00	1130.00	1510.00	1327	1135	718	266
Y	26.50	26.28	35.77	19.76	33.06	22.17	27.1	51.0
Zr	201.00	572.00	809.00	230.00	368.00	755.00	124	91.5
Nb	15.40	15.20	19.10	8.87	17.60	30.40	9.48	9.18
Hf	3.82	13.20	18.70	4.92	/	/	8.78	3.93
Ta	0.60	0.92	1.16	0.49	/	/	2.00	1.68
Pb	11.50	19.70	17.70	8.24	/	/	/	/
Th	9.40	11.60	17.50	4.75	10.50	14.20	28.6	5.24
U	0.72	1.15	2.09	0.60	0.70	0.70	12.9	1.11
La	57.30	28.70	44.00	30.50	52.29	25.78	36.1	35.3
Ce	103.00	61.20	82.40	61.20	97.00	54.64	59.7	58.5
Pr	10.60	6.88	9.05	6.95	11.58	6.69	5.97	6.13
Nd	38.10	27.50	34.70	28.00	40.33	23.62	25.3	27.4
Sm	6.28	5.42	6.88	5.50	7.41	4.31	4.89	5.61
Eu	1.55	1.36	1.48	1.34	1.93	1.17	1.21	1.02
Gd	4.37	4.41	5.53	4.12	6.38	3.86	6.05	6.16
Tb	0.77	0.81	1.05	0.73	1.03	0.67	0.86	1.20
Dy	3.94	4.43	5.90	3.69	6.06	3.81	4.48	7.66
Ho	0.83	1.00	1.26	0.74	1.20	0.78	0.90	2.02
Er	2.20	2.63	3.55	1.87	3.56	2.40	3.32	6.45
Tm	0.30	0.36	0.47	0.23	0.53	0.39	0.12	0.58
Yb	1.93	2.46	3.20	1.55	3.05	2.39	2.77	5.95
Lu	0.27	0.35	0.46	0.21	0.45	0.38	0.36	1.14
□REE	231.44	147.51	199.93	146.63	232.80	130.89	152.03	165.12
LREE/HREE	14.84	7.97	8.33	10.16	9.46	7.92	7.06	4.30
δEu	0.91	0.85	0.73	0.86	0.86	0.88	0.68	0.53
La/Yb	21.31	8.37	9.87	14.12	12.30	7.74	9.35	4.26

注：序号为1~4样品数据为本次研究测定；序号为5~6的样品数据取自文献[13]；序号为7~8的样品数据取自文献[14]

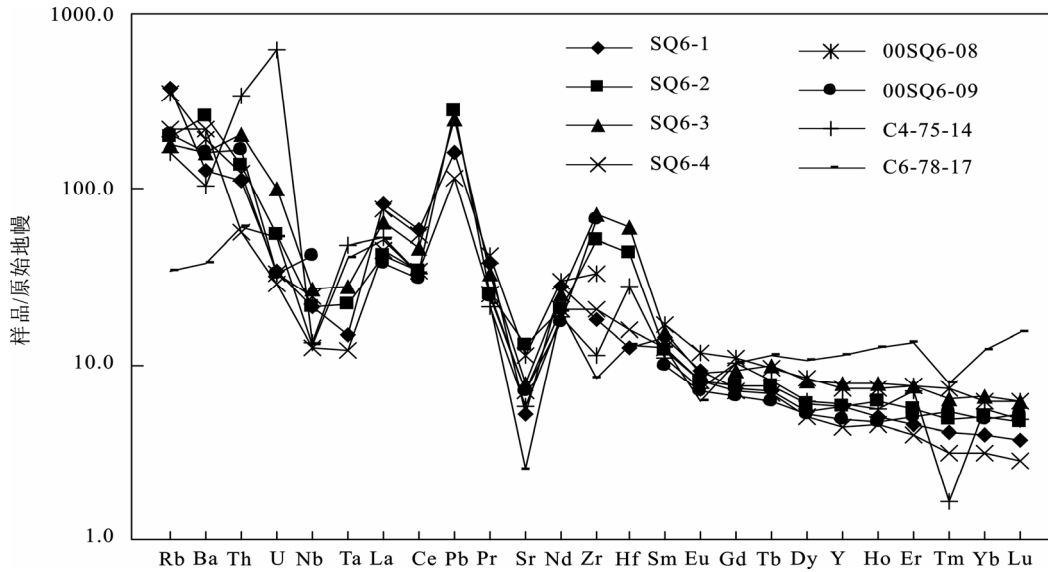


图 3 石桥浅变质岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(原始地幔标准化值据文献[15])

Fig.3 Primitive mantle-normalized spider diagram for low-grade metamorphic rocks in the Shiqiao region (primitive mantle values from [15]) 样品 00SQ-08 和 00SQ-09 数据取自文献[13]; 样品 C4-75-14 和 C6-78-17 数据取自[14]

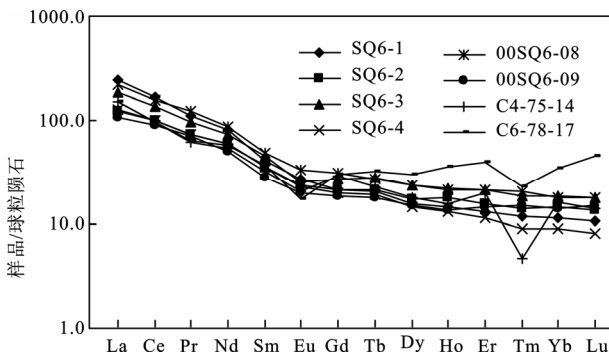


图 4 石桥浅变质岩稀土元素球粒陨石标准化分布模式 (球粒陨石标准化值据文献[15])

Fig.4 Chondrite-normalized REE distribution patterns for low-grade metamorphic rocks in the Shiqiao region (Chondritic values from [15]) 样品 00SQ-08 和 00SQ-09 数据取自文献[13]; 样品 C4-75-14 和 C6-78-17 数据取自[14]

3.3 分析结果

石桥浅变质岩中锆石的 CL 图像(图 5)显示: 既有发育韵律环带的岩浆锆石, 又有不发育韵律环带的变质锆石。在结构上有两层(核、壳)和三层(核、幔、壳)之分, 继承锆石既有岩浆碎屑锆石, 又有具有老核新壳的变质复合锆石, 其年龄测定结果(表 2, 图 6)有如下特征: (1)岩浆碎屑锆石 1 个, Th 含量为 238 $\mu\text{g/g}$, U 含量为 438 $\mu\text{g/g}$, Th/U= 0.54, 年龄为 3127 Ma, 相当于中太古代早期; (2)变质复合锆石的老核(继承锆石)10 个, Th 含量为 31~380 $\mu\text{g/g}$, U 含量为 45~647 $\mu\text{g/g}$, Th/U=0.10~1.13, 年龄值分别属于新太古代晚期(2577、2509、2509 和 2502 Ma)和古

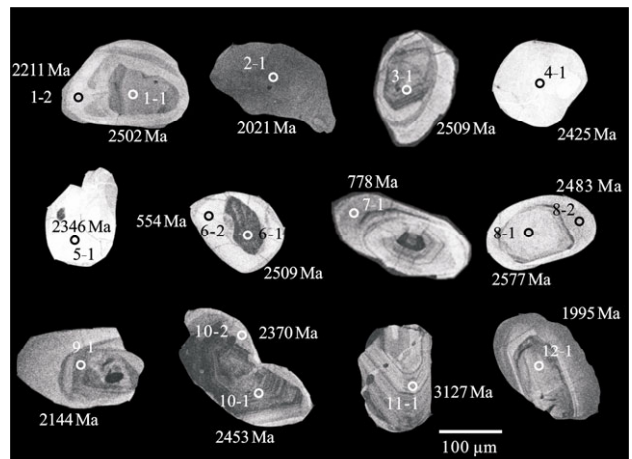


图 5 石桥片岩锆石的 CL 图像及测点位置

Fig.5 Cathodoluminescence images of zircons from Shiqiao schist and sites of points for analyses

元古代(2454、2425、2346、2144、2021 和 1995 Ma); (3)变质复合锆石的新壳 5 个, Th 含量为 73~433 $\mu\text{g/g}$, U 含量为 80~835 $\mu\text{g/g}$, Th/U=0.4~0.91, 其年龄值为 2483、2370、2211、1772 和 1769 Ma(古元古代)、778 Ma(新元古代)和 554 Ma(早寒武世)。

4 结果讨论

4.1 赣榆县石桥浅变质岩的时代

有关石桥浅变质岩的原岩时代, 20 世纪 80 年代初在赣榆幅(1/20 万)区调时曾得到碎屑锆石 U-Pb 上交点年龄 1901 Ma^[19]。随后又定为早元古代^[1]、晚

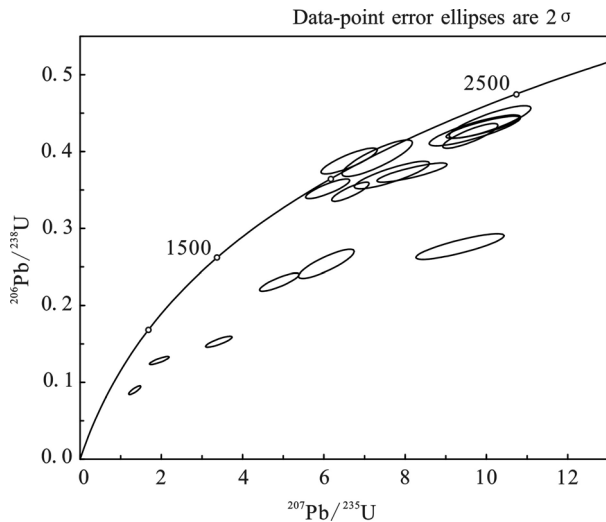


图6 石桥片岩锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 6 Concordia diagrams of U-Pb data for the zircon from schist in the Shiqiao region

元古代^[2]、震旦纪^[3]、晚元古代末期^[4]。另外,包括石桥在内的浅变质岩中,产有震旦-早寒武世藻类化石^[20]。本研究中,锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年结果的 16 个测点中,中太古代 1 个(3127 Ma),新太古代 4 个(2577、2509、2509 和 2502 Ma),古元古代 9 个(2483、2454、2425、2370、2346、2211、2144、2021 和 1995 Ma),新元古代 1 个(778 Ma),早古生代 1 个(554 Ma),其中早古生代年龄相当早寒武世。这表明石桥浅变质岩的时代应该是寒武纪,与该浅变质岩

中产早寒武世藻类化石的特征吻合。

4.2 石桥浅变质岩成因可能性分析

有关石桥浅变质岩的成因,在前文中提到的有“构造窗”^[5]、“沉积盖层”^[4]、“飞来峰”^[6]、“加积楔”^[7]和来自华北板块仰冲的残片^[9]等。以上认识的区别在于原地和非原地之分。本研究结果表明,石桥浅变质岩与大别-苏鲁超高压变质单元中片麻岩等岩石在主成分、锆石成因类型和时代等方面有明显不同:(1)在主成分上,前者富钾(K₂O)贫钠(Na₂O),后者富钠、低钾^[14,21□23]等,暗示其原岩沉积环境的不同;(2)变质复合锆石老核“继承锆石”的时代,前者多集中在中太古代、新太古代和古元古代,后者多集中在新元古代;(3)变质复合锆石新壳的年龄,前者是 2483、2370、2211 Ma(古元古代)和 554 Ma(寒武纪),前述年龄并不是浅变质岩变质时间,而是浅变质岩中“变质复合锆石”的原岩变质时间。后者多在 215 Ma 左右^[24□25],为晚三叠世(退变质时间);(4)沉积盖层,虽是原地,但它在沉积的时间上应晚于苏鲁超高压变质带的退变质时间(211±4) Ma^[25]。从本文获得浅变质岩中变质复合锆石的新壳最年轻的年龄 554 Ma(寒武纪)。后者在石桥片麻岩中变质复合锆石老核“继承锆石”,既有寒武纪(538 Ma)又有奥陶纪(454 Ma)和泥盆纪(401 Ma)。所以老地层(浅变质岩)不可能沉积覆盖在新地层之上。前述现象均

表 2 石桥片岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄数据

Table 2 LA-ICPMS U-Pb dating results of zircons from schist in Shiqiao area

序号	测点	Pb (μg/g)	Th (μg/g)	U (μg/g)	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb (Ma)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U (Ma)
1	SQ6-2-1-1	141	73	251	0.29	0.1643±44	9.6038±2773	0.4204±66	2502±46	2262.4±29.9
2	SQ6-2-1-2	97	83	207	0.40	0.1379±40	6.6515±1878	0.3477±51	2211±50	1923.4±24.2
3	SQ6-2-2-1	122	236	229	1.03	0.1244±43	6.0927±2213	0.3515±52	2021±61	1941.8±24.6
4	SQ6-2-3-1	121	111	200	0.56	0.1650±61	9.9120±3696	0.4316±59	2509±62	2312.8±26.7
5	SQ6-2-4-1	141	31	299	0.10	0.1571±67	8.1686±3518	0.3726±51	2425±72	2041.4±24.1
6	SQ6-2-5-1	23	31	45	0.69	0.1499±75	7.6749±3782	0.3694±73	2346±85	2026.5±34.2
7	SQ6-2-6-1	47	46	75	0.61	0.1650±63	10.0885±4101	0.4386±86	2509±65	2344.2±38.3
8	SQ6-2-6-2	105	433	835	0.52	0.1082±47	1.3445±602	0.0898±23	1769±80	554.1±13.9
9	SQ6-2-7-2	69	231	390	0.59	0.1084±50	1.94930±981	0.1284±21	1772±83	778.5±12.2
10	SQ6-2-8-1	95	172	250	0.69	0.1720±72	6.0596±2801	0.2540±77	2577±75	1459.3±39.4
11	SQ6-2-8-2	52	73	80	0.91	0.1626±74	9.7186±4597	0.4275±82	2483±76	2294.6±37.1
12	SQ6-2-9-1	45	86	76	1.13	0.1335±58	7.3110±3535	0.3913±97	2144±76	2128.7±44.8
13	SQ6-2-10-1	160	380	647	0.59	0.1597±56	3.4151±1329	0.1528±29	2454±59	916.7±16.4
14	SQ6-2-10-2	78	144	240	0.60	0.1521±55	4.9035±1982	0.2303±48	2370±62	1336.2±25.1
15	SQ6-2-11-1	211	238	438	0.54	0.2411±10	9.3493±4436	0.2763±68	3127±66	1572.9±34.4
16	SQ6-2-12-2	85	140	152	0.92	0.1226±52	6.6206±2827	0.3877±69	1995±76	2112.4±32.1

表明石桥浅变质岩不是原地的, 而是来自异地。因此, 用“飞来峰”解释石桥浅变质岩的成因还是可信的。

5 结 论

(1) 石桥浅变质岩富碱、高钾、贫钠。

(2) 石桥浅变质岩的原岩时代, 属于早古生代 (554 Ma), 相当于寒武纪。

(3) 石桥浅变质岩中, “变质复合锆石”新壳的年龄, 反映其原岩时代的年龄。

(4) 石桥浅变质岩的成因, 非原地, 而是异地(飞来峰)。

中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室孙卫东研究员、涂湘林副研究员等协助完成了 U-Pb 年龄的测定, 并提出了许多宝贵的意见, 在此表示衷心的感谢!

参考文献(References):

- [1] 孙竟雄, 吕恩茂, 曹德民, 宗淳虎. 苏北变质地质的几个问题[J]. 中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊, 1988, 9(1): 78-89.
Sun Jing-xiong, Lü En-mao, Cao De-min, Zong Chun-hu. Problems on metamorphic geology of northern part of Jiangsu province[J]. Bull Nanjing Inst Geol Mineral Resour Chinese Acad Geol Sci, 1988, 9(1): 78-89 (in Chinese with English abstract).
- [2] 张树业, 胡克, 刘晓春, 乔兰勇. 中国中部元古代蓝片岩-白片岩-榴辉岩带——古陆内板块裂撞带的三位一体特征[J]. 矿物岩石地球化学通讯, 1989 (2): 101-104.
Zhang Shu-ye, Hu Ke, Liu Xiao-chun, Qiao Lan-yong. The characteristics of Proterozoic blueschist-whiteschist-eclogite in central China: A trinity of ancient intercontinental collapse collision zone[J]. Bull Mineral Petrol Geochem, 1989 (2): 101-104 (in Chinese).
- [3] 樊金涛. 江苏连云港-淮阴地区前寒武系沉积岩稀土地球化学及其时代[J]. 地质论评, 1993, 39(5): 381-388.
Fan Jin-tao. The REE geochemis of sedimentary rocks in the Lianyungang-Huaiyin area, Jiangsu Province, and their geologic age[J]. Geol Rev, 1993, 39(5): 381-388 (in Chinese with English abstract).
- [4] 胡克, 姜琪刚, 周建波, 杨德明. 华北地台南缘晋宁运动的初步研究[J]. 中国区域地质, 1996 (1): 31-35.
Hu Ke, Jiang Qi-gang, Zhou Jian-bo, Yang De-ming. The Jin-ning movement of the southern margin of the North China Platform[J]. Reg Geol China, 1996 (1): 31-35 (in Chinese with English abstract).
- [5] 董树文, 张勇, 黄德志, 王小凤, 薛林家. 苏北超高压变质带石桥构造窗地质特征[J]. 安徽地质, 1996, 6(1): 9-14.
Dong Shu-wen, Zhang Yong, Huang De-zhi, Wang Xiao-feng, Xue Lin-jia. The discovery and implication of the “Shiqiao Structural Window” in ultrahigh pressure metamorphosed belt in north Jiangsu, China[J]. Geol Anhui, 1996, 6(1): 9-14 (in Chinese with English abstract).
- [6] 宋明春, 宋志勇. 对胶南造山带朋河石岩组的几点新认识[J]. 山东地质, 1998, 14(1): 25.
Song Ming-chun, Song Zhi-yong. The latest understanding on the Penghe group in Jiaonan orogenic belt[J]. Geol Shandong, 1998, 14(1): 25 (in Chinese with English abstract).
- [7] 周建波, 郑永飞, 李龙, 谢智. 扬子板块俯冲的构造加积楔[J]. 地质学报, 2001, 75(3): 338-352.
Zhou Jian-bo, Zheng Yong-fei, Li Long, Xie Zhi. Accretionary wedge of the subduction of the Yangtze plate[J]. Acta Geol Sinica, 2001, 75(3): 338-352 (in Chinese with English abstract).
- [8] Zhou Jian-bo, Wilde S A, Zhao Guo-chun, Zheng Chang-qing, Jin Wei, Zhang Xing-zhou, Cheng Hong. Detrital zircon U-Pb dating of low-grade metamorphic rocks in the Sulu UHP belt: evidence for overthrusting of the North China Craton onto the South China Craton during continental subduction[J]. J Geol Soc London, 2008, 165(1): 423-433.
- [9] Okay A I, Xu S T, Sengör A M C. Coesite from the Dabieshan eclogites, central China[J]. Eur J Mineral, 1989, 1(4): 595-598.
- [10] Wang X M, Liou J G, Mao H K. Coesite-bearing eclogites from the Dabie Mountains in central China[J]. Geology, 1989, 17(12): 1085-1088.
- [11] Xu Shutong, Okay A I, Ji Shouyuan, Sengör A M C, Su Wen, Liu Yican, Jiang Laili. Diamond from the dabie shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting[J]. Science, 1992, 256(5053): 80-82.
- [12] 刘建辉, 周建波, 郑常青. 苏鲁超高压带内石桥浅变质岩的地质成因及其研究意义[J]. 矿物岩石, 2005, 25(2): 40-46.
Liu Jian-hui, Zhou Jian-bo, Zheng Chang-qing. The geological genesis and significance of the low-grade metamorphic rocks at Shiqiao in the Sulu ultrahigh pressure zone[J]. J Mineral Petrol, 2005, 25(2): 40-46 (in Chinese with English abstract).
- [13] 周建波, 刘建辉, 郑常青. 苏鲁造山带浅变质岩的成因及其大地构造意义[J]. 地质学报, 2005, 79(4): 475-486.
Zhou Jian-bo, Liu Jian-hui, Zheng Chang-qing. Geological genesis and tectonic implications of low-grade metamorphic rocks in Sulu orogenic belt[J]. Acta Geol Sinica, 2005, 79(4): 475-486 (in Chinese with English abstract).
- [14] 刘福来, 许志琴, 张泽明, 杨经绥. 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 Fu-lai, Xu Zhi-qin, Zhang Ze-ming, Yang Jing-sui. Petrology and geochemistry of gneiss and granitic gneiss from Pre-pilot Drillhole (CCSD-PP1), Chinese Continental Scientific Drilling Project[J]. Acta Geol Sinica, 2001, 75(1): 70-81 (in Chinese with English abstract).
- [15] Sun S-s, McDough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and

- processes[M]//Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins[J]. Geol Soc Spec Pub, 1989, 42: 313-345.
- [16] 张玉泉, 夏斌, 梁华英, 刘红英, 林清茶. 云南大平康花岗岩化花岗岩的锆石特征及其地质意义[J]. 高校地质学报, 2004, 10(3): 378-384.
Zhang Yu-quan, Xia Bin, Liang Hua-ying, Liu Hong-ying, Lin Qing-cha. Characteristics of zircons for dating from Daping mylonitized alkaline granite in Yunnan and their geologic implications[J]. Geol J China Univ, 2004, 10(3): 378-384 (in Chinese with English abstract).
- [17] 涂湘林, 张红, 邓文峰, 凌明星, 梁华英, 刘颖, 孙卫东. RESOLUTION 激光剥蚀系统在微量元素原位微区分析中的应用[J]. 地球化学, 2011, 40(1): 83-98.
Tu Xiang-lin, Zhang Hong, Deng Wen-feng, Ling Ming-xing, Liang Hua-ying, Liu Ying, Sun Wei-dong. Application of RESOLUTION in-situ laser ablation ICP-MS in trace element analyses[J]. Geochimica, 2011, 40(1): 83-98 (in Chinese with English abstract).
- [18] Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C G, Chen H H. *In situ* analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chem Geol, 2008, 257(1/2): 34-43.
- [19] 张志敏. 1:20万赣榆幅区域地质调查报告[R]. 南京: 江苏省地质资料馆, 1982.
Zhang Zhi-min. Regional geology surveying report for 1:200000 Ganyu sheet of the People's Republic of China[R]. Nanjing: Jiangsu Library of Geological Information, 1982.
- [20] 赵达, 程立人, 刘茂修. 胶南地区五莲群中管孔藻类的发现及其意义[J]. 中国区域地质, 1995, 14(4): 379-384.
Zhao Da, Cheng Li-ren, Liu Mao-xiu. The discovery of solenopora in the Wulina group in the Jiaonan area, Shangdong, and its significance[J]. Reg Geol China, 1995, 14(4): 379-384 (in Chinese with English abstract).
- [21] Wang Q, Xu J F, Wang J X, Zhao Z H, Wang R J, Qiu J X. The recognition of adakite-type gneisses in the North Dabie Mountain and its implication to ultrahigh pressure metamorphic geology[J]. Chinese Sci Bull, 2000, 45(21): 1927-1933.
- [22] 郑祥身, 金成伟, 翟明国, 石永红. 北大别灰色片麻岩的岩石化学特征及大地构造背景[J]. 岩石学报, 1999, 15(3): 350-358.
Zheng Xiang-shen, Jin Cheng-wei, Zhai Ming-guo, Shi Yong-hong. Petrochemistry and tectonic background of the gray gneisses in north Dabie terrane[J]. Acta Petrol Sinica, 1999, 15(3): 350-358 (in Chinese with English abstract).
- [23] 鄢全树, 钟增球, 周汉文. 大别超高压变质地体四道河地区岩石学研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 24(3): 186-196.
Yan Quan-shu, Zhong Zeng-qiu, Zhou Han-wen. Petrology of Sidaohe area in UHP metamorphic terrane, the Dabie Mountains[J]. Acta Petrol Mineral, 2005, 24(3): 186-196 (in Chinese with English abstract).
- [24] 刘福来, 许志琴, 宋彪. 苏鲁地体超高压和退变质时代的厘定: 来自片麻岩锆石微区 SHRIMP U-Pb 定年的证据[J]. 地质学报, 2003, 77(2): 229-237.
Liu Fu-lai, Xu Zhi-qin, Song Biao. Determination of UHP and retrograde metamorphic ages of the Sulu terrane: Evidence from SHRIMP U-Pb dating on zircons of gneissic rocks[J]. Acta Geol Sinica, 2003, 77(2): 229-237 (in Chinese with English abstract).
- [25] 刘敦一, 简平. 大别山双河硬玉石英岩的超高压变质和退变质事件——SHRIMP 测年的证据[J]. 地质学报, 2004, 78(2): 211-217.
Liu Dun-yi, Jian Ping. 243 Ma UHP and 228 Ma retrograde events of the Shuanghe jadeite quartzite, eastern Dabie Mountains——SHRIMP dating, mineral inclusions and zircon REE patterns[J]. Acta Geol Sinica, 2004, 78(2): 211-217 (in Chinese with English abstract).