

时国, 郭福生, 谢财富, 等. 赣中相山铀矿田基底变质岩原岩恢复及其形成环境[J]. 中国地质, 2015, 42(2): 457-468.

Shi Guo, Guo Fusheng, Xie Caifu, et al. Protoliths reconstruction and formation conditions of basement metamorphic rocks in the Xiangshan uranium orefield, Central Jiangxi[J]. *Geology in China*, 2015, 42(2): 457-468(in Chinese with English abstract).

赣中相山铀矿田基底变质岩原岩恢复及其形成环境

时 国^{1,2,3} 郭福生^{1,3} 谢财富³ 余关美³

(1. 江西省核资源与环境重点实验室, 江西南昌 330013; 2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;
3. 东华理工大学地球科学学院, 江西南昌 330013)

摘要: 微古化石资料和前人研究表明, 相山铀矿田基底变质岩原岩时代为新元古代青白口纪。文章通过野外地质调查和系统采样对这套变质岩的原岩组成和形成环境进行了分析。大部分变质碎屑岩样品以中等 SiO₂ 含量、高的 K₂O/Na₂O 值和较高的 Fe₂O₃+MgO 及低的 CaO 含量为特征。所有样品的稀土元素具有 ΣREE 总量较大、轻稀土富集和 Eu 亏损的特征。稀土元素分布模式图解中各样品的总体组成模式相当接近, 稀土配分型式为右倾式, 与后太古宙页岩和上地壳相似。西蒙南图解和涅洛夫图解表明, 神山组原岩主要为复矿物砂岩和长石砂岩, 库里组原岩主要为石英岩质砂岩及长石砂岩; 上施组原岩主要为长石砂岩及少量硅质泥灰岩、泥质砂岩。结合变余构造特征分析认为, 这套变质碎屑岩形成于滨浅海—陆棚沉积环境。所有样品中 Th/Sc 比值变化范围较小(0.5~1.1), 而 Zr/Sc 比值变化范围较大(8~24), 揭示了变质岩源区成分复杂, 可能经过多次沉积循环。在 Th-Sc-Zr/10 和 La-Th-Sc 图解中, 大部分数据落入大陆岛弧区, 说明该套岩石可能沉积于靠近大陆岛弧的相关盆地。Hf-La/Th 图解表明, 原岩的物源大部分来源于古老地层的抬升剥蚀, 酸性岛弧源区仅占少数, 说明其沉积时期岩浆活动并不明显, 而物源区伴有构造隆升, 结合地化特征分析推测赣中相山基底变质岩原岩形成于华夏地块与扬子板块后碰撞伸展环境下的残留海盆。

关键词: 变质岩; 原岩恢复; 地球化学; 构造环境; 相山铀矿田

中图分类号:P581; P511.5 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2015)02-0457-12

Protoliths reconstruction and formation conditions of basement metamorphic rocks in the Xiangshan uranium orefield, Central Jiangxi

SHI Guo^{1,2,3}, GUO Fu-sheng^{1,3}, XIE Cai-fu³, YU Guan-mei³

(1. Jiangxi Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, Nanchang 300133, Jiangxi, China; 2. Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China; 3. College of Geosciences, East China Institute of Technology, Nanchang 330013 Jiangxi, China)

Abstract: Located in the suture zone of the Cathaysia and Yangtze tectonic belt and lies on the southern side of Jiangshao fault, the

收稿日期: 2014-04-02; 改回日期: 2014-06-19

基金项目: 中国地质调查局工作项目(1212011120836)、江西省博士后科研择优资助项目(2014KY31)和国家自然科学基金青年基金项目(41002007)联合资助。

作者简介: 时国, 男, 1978年生, 讲师, 博士后, 主要从事区域地质调查及沉积学的教学科研工作; E-mail: sdsg1979@aliyun.com。

通信作者: 郭福生, 男, 1962年生, 教授, 博士, 主要从事沉积学与区域地质调查研究工作; E-mail: fsguo@263.net。

Xiangshan uranium orefield is the largest volcanic uranium orefield and is also the earliest discovered volcanic uranium orefield in China. Its basement is a set of ancient metamorphic rock series. Micro palaeophyte fossils and previous studies indicate that the basement metamorphic rocks formed in the Qingbaikou period of Neoproterozoic. This paper mainly discusses the composition of metamorphic rock and analyzes its formation environment. Most metamorphic samples are characterized by intermediate SiO_2 content, high $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ and $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}+\text{MgO}$, and obviously low CaO content. Analytical results of all samples show larger total ΣREE values and abundant LREE, as well as depletion of Eu, implying that the rock samples originated from the continental crust. The overall compositions of various sample patterns are very close to each other in the REE distribution diagram, and REE patterns of all samples are of right-oblique type, similar to patterns of the post-Archean shale and the upper crust. From the Simonen and Nieli diagram, the authors infer that the original rocks of Shenshan Formation were mainly composed of complex mineral sandstones and feldspathic sandstone, the original rocks of Kuli Formation consisted mainly of quartzite sandstone and feldspathic sandstone, and the original rocks of Shangshi Formation comprised mainly feldspathic sandstone, with a little siliceous marl and shale sandstone. Combined with residual structural features analysis, it is inferred that these metamorphic clastic sedimentary rocks formed in a shallow shore - shelf sedimentary environment. Th/Sc ratios of all samples vary in a small range (0.5-1.1), while Zr/Sc ratios vary quite considerably (8-24), revealing the complex composition of the source region of the metamorphic rocks and the probable existence of several sedimentary cycles. In Th-Sc-Zr/10 and La-Th-Sc diagram, most of the data fall into the continental island arc area, indicating that this set of rocks might have been deposited in the basins near the continental island arc. Hf-La/Th diagrams indicate that the provenance of the original rock mostly came from ancient strata of uplift and erosion, and acidic arc source region only possessed a small proportion. It is thus obvious that the magmatic activity during its deposition was not obvious, but the source region was accompanied by tectonic uplift. Combined with geochemical characteristics, it is held that the protoliths of basement metamorphic rocks in the Xiangshan uranium orefield were formed in the residual basin of an extension environment, resulting from the post-collision between Cathaysia and Yangzi Blocks.

Key words: metamorphic rocks; protolith reconstruction; geochemistry; tectonic setting; Xiangshan uranium orefield

About the first author: SHI Guo, male, born in 1978, lecturer and post-doctoral, majors in regional geological survey and sedimentology; E-mail: sdsg1979@aliyun.com.

About the corresponding author: GUO Fu-sheng, male, born in 1962, professor, supervisor of doctor candidates, engages in regional geological survey and study of sedimentology; E-mail: fsguo@263.net.

华南变质基底的成因、时代及形成环境等一系列问题是了解早期地壳演化的重要窗口。扬子和华夏之间盆地性质的厘定及其构造演化对了解华南大地构造属性具有重要意义^[1-2]。殷鸿福等认为扬子与华夏之间在加里东期拼合之前存在一个洋盆——南华洋^[3]。王剑等通过沉积学研究提出了华南新元古代裂谷盆地模式^[4]。尹福光等(2003)提出华南地区是3大陆块群(冈瓦纳大陆群、劳亚大陆群和泛华夏大陆群)中的泛华夏大陆群的东南缘多岛弧系统的组成部分^[5]。近年来通过对锆石年龄的研究,很多学者^[1,6]已经基本认同华夏和扬子在850~820 Ma碰撞拼合,形成新元古代晚期的江南造山带。

相山铀矿田位于华夏与扬子拼合带——江绍断裂南侧,是中国发现最早、规模最大的火山岩型铀矿田,其基底为一套古老的变质岩系。对这套基底变质岩的原岩建造特征、形成环境以及演化规律的研究,

不仅可以为了解华南新元古代构造背景提供重要材料,也对进一步认识该地区地壳演化和铀等金属成矿作用有重要意义^[7-9]。笔者近期在该地区陀上等3幅1:5万区调工作过程中,通过沉积碎屑岩的地球化学分析方法结合野外露头特征,对赣中相山基底变质岩的原岩成分、形成环境进行了讨论分析。

1 地质背景及岩性、岩相特征

研究区位于扬子板块与华南板块缝合线——江绍断裂南侧,NE向的遂川—德兴深断裂从该区的西北角穿过,东临NNE向鹰潭—安远断裂(图1-a),构造单元区划隶属华夏陆块赣中—赣南残块的北部^[10],地层区划属华南地层大区东南地层区之湘桂赣地层分区,区内变质岩发育,主要分布于相山火山盆地周边,系区域古老的褶皱基底,总体为一套中—浅变质的砂泥质复理石建造^[11]。白垩系及第

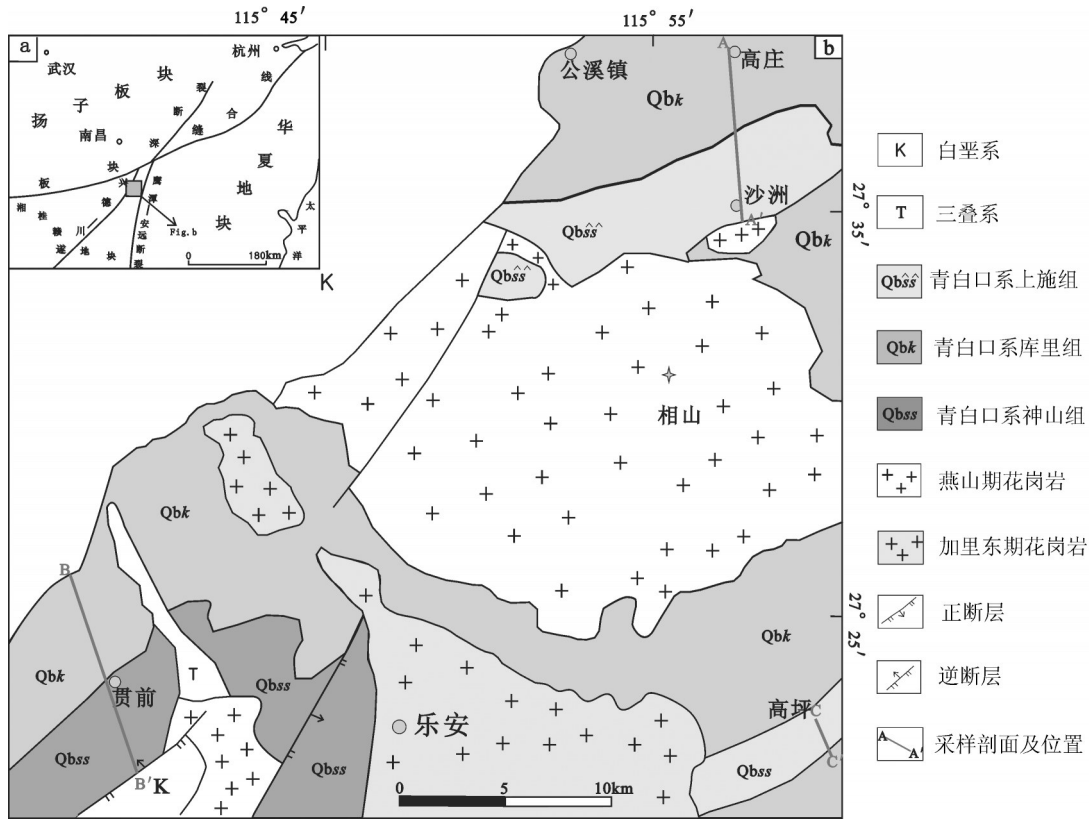


图1 相山地区区域地质简图
Fig.1 Geological sketch map of Xiangshan area

四系多呈NE向断陷盆地展布,三叠系、侏罗系也有零星分布(图1-b)。尽管这套基底变质岩经历了较强区域构造面理置换,但在部分地区其原始沉积构造及序列仍可辨晰(图2-a、b),江西省地质调查研究院将其划分为3个组,自下而上依次为神山组、库里组、上施组,基于这3个组中的微古植物化石特征,以及在1:5万七琴街幅区调获得库里组中变基性熔岩锆石U-Pb年龄为(1027±36) Ma,将其归为新元古代青白口纪^[11]。章邦桐等在陀上幅东侧邻区的相山北部贯下村现划为库里组地层中的似层状斜长角闪岩(原岩定为拉斑玄武质火成岩)获得全岩-矿物(角闪石)Sm-Nd等时线年龄值为(1113±49) Ma,认为原岩形成于中元古代^[12]。胡恭任等获得相山北部十字石云母片岩及斜长角闪片岩的Rb-Sr等时线年龄分别为719.7 Ma和727.6 Ma,认为变质时代为新元古代而非加里东期^[13]。本次工作测制3条剖面,对神山组、库里组和上施组分别采集岩石标本和锆石年龄样品,同时也获得少量微古化石

Leiosphaeridia、*Synsphaeridium*、*Lophosphaeridium*、*Laminarites*等新元古代晚期常见分子,对这3个组变质沉积岩中的代表性样品进行了碎屑锆石U-Pb定年,其年龄峰值主要集中在800~810 Ma,限定了该变质岩原岩的沉积时代,推测其形成于青白口纪晚期。

通过野外调查和镜下观察,该地区出露于地表的基底变质岩受变形变质作用影响明显,岩石类型存在较大差异。在相山火山盆地北部主要发育库里组和上施组,在高庄—沙洲剖面中(图1-b)库里组岩性主要为含十字石榴千枚状二云(黑云母绢云母)片岩、含石榴二云石英片岩(图2-c)、角岩化变细砂岩,变斑晶为十字石、石榴石和黑云母,含量5%~25%不等,基质中石英多呈粒状,个别略有拉长定向,白云母定向排列,黑云母无定向排列(图2-c),成镶嵌状,粒径0.1~0.5 mm,重矿物中的锆石多具磨圆。上施组由含石榴子石二云石英岩、石榴子石二云千枚岩、含石榴子石黑云母变粉砂岩夹少量黑云

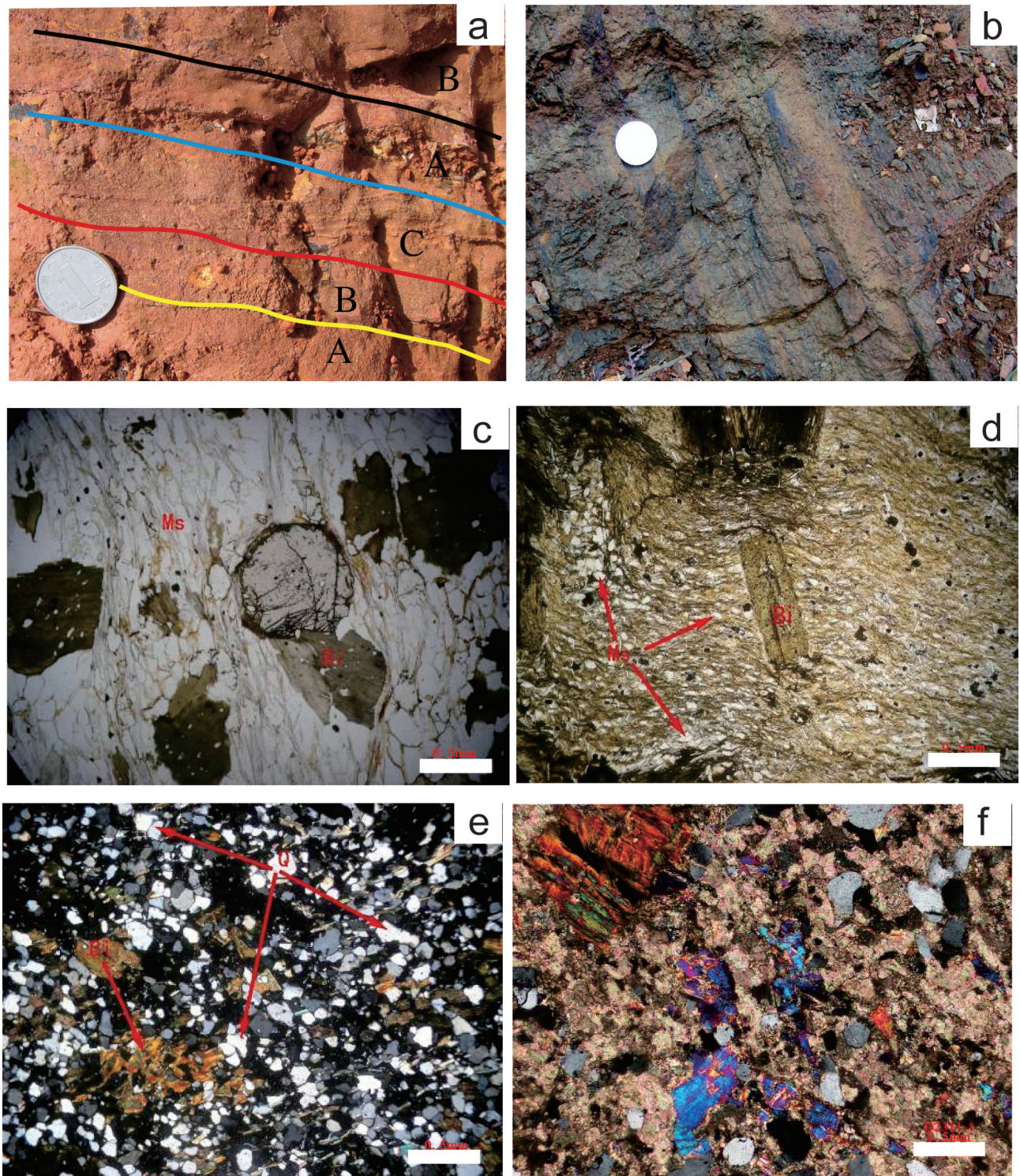


图2 相山地区部分变质岩野外露头及显微照片
 a、b—变余层理构造；c—含石榴二云石英片岩；d—石榴子石二云千枚岩；e—变细砂岩；f—黑云石英大理石；
 Bi—黑云母；Ms—白云母；Q—石英

Fig.2 Photographs and microphotographs of metamorphic rocks of the study area
 a, b—Blastobedding structure; c—Garnet biotite quartz schist; d—Garnet biotite phyllite; e—Meta-sandstone;
 f—Biotite quartz marble; Bi—Biotite; Ms—Muscovite; Q—Quartz

石英大理岩(图2-f)组成。也表现为在区域变质作用的基础上叠加了接触变质作用,特征变质矿物十字石、石榴石和黑云母发育,其变形、变质程度相对较强。黑云母含量为20%,粒度0.1~1 mm,无定向排列,黑云母变斑晶与绢云母片理方向不一致(图2-d)。相山南部区域变质岩发育为主,贯前剖面(图2-b)中神山组以一套深灰色绢云石英片岩夹炭质千枚岩为特征,岩性单调,厚度巨大,仅局部叠加热接触变质作用,发育特征变质矿物石榴子石和黑云母,且变形较强,褶皱发育。高坪剖面中上施组岩性以绢云石英千枚岩、变细砂岩(图2-e)、粉砂质绢云千枚岩为主,主要遭受区域变质作用。千枚岩类多具鳞片(粒状)变晶结构、千枚状构造,沿板理或千枚理,岩石易开裂。多数千枚岩为含粉砂或细砂的千枚岩类,含有一定量的粉砂或细砂碎屑,与绢云千枚岩相比,粒度较粗。碎屑物质在后期构造置换的过程中,均沿千枚理方向发生了压扁拉长,部分出现亚颗粒化现象。

2 样品处理及分析方法

样品采集于高庄等3个剖面的新元古代的神山组、库里组和上施组。采集了新鲜的用于矿物成分分析的变质砂岩、片岩、千枚岩及黑云石英大理岩。主量元素采用AxiosMAX X射线荧光光谱仪测定,分析精度优于5%。微量和稀土元素采用X Series II 等离子体质谱仪、OPTIMA 2100DV 等离子体发射光谱仪测定,分析精度优于5%。样品测试均在湖北省地矿局鄂东北实验室完成。

3 地球化学特征及原岩恢复

3.1 地球化学特征

样品的主量元素、微量元素分析结果见表1~2,神山组、库里组和上施组主量元素含量具有一致性(神山组SiO₂平均值64.16%, Al₂O₃平均值16.61%, Fe₂O₃^T平均值为6.58%; 库里组SiO₂平均值69.24%, Al₂O₃平均值14.87%, Fe₂O₃^T平均值为6.48%; 上施组SiO₂平均值63.51%, Al₂O₃平均值14.57%; Fe₂O₃^T平均值为6.65%)。砂岩、片岩SiO₂含量为63.09%~76.95%; Al₂O₃含量为11.23%~17.88%, CaO含量变化较大,介于0.01%~0.86%,主要集中在0.12%~0.60%, Al₂O₃/(K₂O+Na₂O+CaO)比值均大于2.5, K₂O/

Na₂O比值大多数大于1,部分小于1。MgO含量在1.38%~2.36%。千枚岩类SiO₂含量48.91%~73.74%; Al₂O₃含量为12.39%~22.37%, Al₂O₃/(K₂O+Na₂O+CaO)比值大于2; K₂O/Na₂O比值大部分大于1,只有2个值小于1; CaO含量较低,为0.09%~1.74%,大部分都小于0.47%, MgO含量大部分为1.5%~2.5%,含量变化较窄。上述化学成分及其相关比值显示,原岩总体具有低的成分成熟度,钙质含量低,说明岩石中碳酸盐矿物及含钙的斜长石较少,这与宏观地质特征相一致,测区仅上施组地层中极少含有碳酸盐岩层(样品D2311),岩石中斜长石含量亦较低。基底3个组变质岩中常量元素与古生代北美页岩(PAAS)^[14]比较, SiO₂、Al₂O₃、SiO₂、Al₂O₃、MgO、Fe₂O₃^T、Na₂O含量基本一致。微量元素与PASS比较, Ba、Hf、Ni、Rb、Th、U、Zr含量相似, Sr、Mn、Co、Nb、Ta含量相对偏低,反映沉积物源岩有酸性岩存在。

神山组、库里组和上施组稀土元素均具有 Σ REE总量较大、轻稀土富集,同时Eu亏损的特征。神山组 Σ REE=(135.49~263.07) $\times 10^{-6}$,平均195.38 $\times 10^{-6}$ 。而 Σ LREE/ Σ HREE比值则变化较小:7.05~9.85, δ Eu=0.68~0.78。库里组 Σ REE=(124.61~263.58) $\times 10^{-6}$,平均175.82 $\times 10^{-6}$, Σ LREE/ Σ HREE比值则变化也较小:6.87~8.20, Eu更加亏损(δ Eu=0.59~0.69)。上施组除D6002和D2311的 Σ REE小于100 $\times 10^{-6}$ 外, Σ REE为(147.01~251.83) $\times 10^{-6}$, Σ LREE/ Σ HREE比值则变化较小(除D6002为4.81):7.28~9.32, Eu较库里组有所增加, δ Eu=0.63~0.85,与神山组多数样品REE特征相似。稀土元素分布模式图解中(图3),除样品D2311外,各样品的稀土元素总体组成模式相当接近,呈右倾斜,与上地壳和后太古宙页岩相似^[14],说明它们来自上地壳。常量、微量和稀土元素特征显示神山组、库里组和上施组沉积物来自上地壳,源岩有酸性岩存在。

3.2 原岩分析

研究区变质岩受变质和变形作用的影响,大部分岩石的原岩结构和构造难以保存,且原生矿物成分残余较少,难以恢复其原岩。但还是少数岩石残存有原岩结构特征,库里组变质砂岩中除了变斑状矿物外,基质为变余砂状结构(图2-c),在相山南部神山组中变余水平层理发育(图2-b),上施组中

表1 相山基底变质岩常量元素(%),微量元素和稀土元素(10^{-6})组成
Table 1 Geochemical composition of the metamorphic rocks basement of the Xiangshan uranium orefield
(major elements: %, trace elements: 10^{-6})

分析项目	上施组										库里组		
	二云片岩		千枚岩				变砂岩		大理岩		石英片岩		
	D0150.1	D6005.3	D0153.1	D6003.3	D6004.6	D6005.2	D0149.1	D0159.1	D6002.2	D2311.1	D0138.1	D0138.6	D0143.4
SiO ₂	63.31	64.49	71.97	67.36	67.05	48.91	73.02	73.74	67.88	37.35	70.54	75.34	63.06
Al ₂ O ₃	17.24	15.33	13.15	15.23	14.45	22.37	13.19	12.38	14.49	7.92	14.05	11.79	18.06
Fe ₂ O ₃	2.78	3.99	1.45	3.12	1.14	5.19	2.02	1.13	2.71	0.74	1.99	1.19	1.56
FeO	5.12	3.55	3.95	2.55	4.42	4.88	2.92	4.02	3.25	3.39	3.68	3.48	5.6
MgO	2.36	2.81	1.62	2.28	2.32	3.97	1.53	1.52	2.33	1.77	1.92	1.36	2.41
CaO	0.35	0.29	0.47	0.15	1.38	0.47	0.11	0.31	0.86	24.49	0.30	0.41	0.37
Na ₂ O	1.41	0.842	2.635	1.31	3.206	0.578	0.33	1.929	2.015	0.40	0.73	2.25	1.58
K ₂ O	3.26	3.29	1.69	3.12	2.39	5.82	3.52	2.43	1.44	2.33	3.59	1.94	3.96
TiO ₂	0.93	0.81	0.63	0.83	0.85	1.167	0.59	0.59	0.85	0.38	0.68	0.63	0.82
MnO	0.16	0.07	0.12	0.07	0.13	0.08	0.03	0.09	0.103	0.45	0.04	0.06	0.11
P ₂ O ₅	0.11	0.17	0.15	0.04	0.18	0.25	0.05	0.08	0.16	0.05	0.1	0.10	0.15
烧失量	2.61	4.14	1.87	3.76	2.08	5.96	2.47	1.51	3.65	20.6	2.2	1.25	1.93
B	154.75	51.94	169.89	39.96	44.96	603.07	56.38	5.38	50.32	1.62	4.93	15.27	23.87
F	455.4	450.19	343.5	425.88	440.2	707.2	316.8	339.3	231.4	497.0	475.6	353.1	565.01
Ba	362	805	230	753	459.10	1164	371	325	373	360	410.60	320	409
V	124	110.5	82.47	147.4	132.05	211.1	91.75	86.08	113.8	44.9	110.15	81.64	157.7
Cr	106.86	66.34	68.70	78.91	70.62	110.34	72.69	77.35	74.12	35.50	82.97	82.40	99.13
Zr	281.53	192.55	239.69	188.38	188.89	255.88	209.56	226.87	185.04	82.9	172.66	282.2	175.74
Sc	19.99	18.07	13.11	21.41	17.68	30.89	14.49	11.8	18.32	10.9	15.935	11.64	23.98
Sr	47.77	89.8	76.48	91.41	249.05	108.5	38.99	58.69	155.7	409	51.945	79.46	67.12
Ga	22.93	22.1	16.1	23.99	19.915	33.46	18.64	16.27	19.42	14.8	19.85	15.02	21.76
Li	49.72	61.05	41.03	48.06	38.38	90.26	43.27	37.05	49.31	38.4	49.27	33.04	54.06
Be	2.82	2.20	2.36	2.80	3.38	4.33	2.31	1.60	2.75	1.81	2.27	2.05	2.26
Co	23.97	18.51	18.01	14.95	17.54	33.21	11.79	15.08	16.51	18.8	21.41	15.28	19.53
Ni	50.32	37.00	27.78	39.79	35.67	77.27	23.42	26.31	34.94	34.3	38.00	26.86	41.70
Cu	28.72	44.16	13.83	39.32	16.01	41.26	53.78	19.42	33.18	2.64	67.26	42.19	8.34
Zn	103.50	117.90	88.08	104.30	97.39	161.40	93.24	92.12	101.60	60	89.93	83.27	51.22
Rb	85.43	59.85	42.43	62.26	53.74	99.92	72.31	60.41	54.10	142	75.06	56.15	74.21
Nb	14.34	5.40	9.53	13.65	8.08	21.37	10.56	9.41	10.49	13.1	10.80	9.46	15.75
Th	17.32	10.59	13.61	12.60	10.93	17.42	15.02	11.78	10.68	12.3	12.82	12.86	18.27
U	3.28	1.73	2.43	1.89	1.90	3.13	2.57	2.32	1.79	1.45	2.46	2.63	3.11
Y	40.47	24.71	23.39	28.33	21.81	40.90	19.23	19.23	21.94	11.6	20.57	23.32	35.60
La	50.81	29.54	31.80	36.14	32.57	47.88	31.23	30.54	15.63	20	24.24	33.22	36.81
Ce	93.79	56.17	64.83	68.39	63.84	101.46	63.77	61.60	27.66	38.3	50.41	64.71	78.96
Pr	10.64	6.93	6.99	8.37	6.95	11.36	6.87	6.58	3.53	4.41	5.53	7.13	8.76
Nd	44.54	29.41	29.43	35.23	29.12	49.41	29.09	27.07	15.33	15.8	23.21	29.66	37.28
Sm	9.37	6.12	6.42	7.28	5.83	10.35	6.09	5.39	3.35	2.96	4.89	6.05	8.31
Eu	1.80	1.36	1.37	1.63	1.33	2.08	1.24	1.12	0.89	0.58	1.01	1.26	1.49
Gd	7.70	4.98	5.15	5.71	4.61	8.30	4.90	4.25	2.88	2.93	3.89	4.88	6.53
Tb	1.35	0.86	0.89	0.96	0.75	1.44	0.80	0.71	0.55	0.41	0.69	0.83	1.17
Dy	7.71	4.96	4.93	5.38	4.17	8.06	4.18	3.85	3.55	2.22	4.08	4.63	6.94
Ho	1.52	0.98	0.92	1.07	0.86	1.58	0.79	0.75	0.81	0.41	0.84	0.91	1.37
Er	4.48	2.81	2.74	3.20	2.69	4.65	2.35	2.30	2.59	1.18	2.56	2.73	4.02
Tm	0.65	0.41	0.40	0.48	0.41	0.66	0.35	0.35	0.40	0.18	0.39	0.40	0.58
Yb	4.09	2.48	2.62	2.98	2.68	4.04	2.25	2.20	2.65	1.28	2.52	2.58	3.54
Lu	0.57	0.33	0.36	0.41	0.37	0.55	0.32	0.32	0.38	0.19	0.36	0.36	0.48
ΣREE	239.01	147.32	158.85	177.20	156.15	251.83	154.24	147.01	80.20	90.85	124.61	159.35	196.23
LREE	210.94	129.53	140.84	157.03	139.62	222.54	138.29	132.29	66.39	82.05	109.27	142.02	171.60
HREE	28.06	17.80	18.02	20.17	16.52	29.29	15.94	14.71	13.81	8.8	15.34	17.33	24.63
LREE/HREE	7.52	7.28	7.82	7.79	8.45	7.60	8.68	8.99	4.81	9.32	7.12	8.20	6.97
La _N /Yb _N	8.91	8.54	8.71	8.70	8.72	8.49	9.96	9.97	4.24	11.21	6.89	9.22	7.45
δEu	0.63	0.73	0.71	0.74	0.76	0.66	0.67	0.69	0.85	0.60	0.68	0.69	0.60

除变余平行层理、斜层理外,还发育ABC型鲍马序列组合(图2-a)。在这3个组中未见沉积间断,说明为一套连续沉积序列,可初步判断为一套海相砂岩、泥岩沉积。根据测区各类变质岩的化学分析结果,采用尼格里化学计算方法得出各特征数值,进行(al+fm)-(c+alk)对Si的西蒙南图解(图4-a),神山组、库里组和上施组的大部分样品均落入了泥质沉

积岩和砂质沉积岩及其过渡区域中,部分靠近泥质、砂质沉积岩和火山岩的过渡区域,仅有上施组1个样品落入钙质沉积岩区。说明测区新元古代浅变质碎屑岩原岩基本以泥砂质为主,这与岩石野外宏观特征基本一致。涅洛夫图解^[15]能够比较详细地区分泥质岩、砂质岩和铁质岩的不同类型,同时能反映各种泥质岩形成的古地理和气候。在该图解

表2 相山基底变质岩常量元素(%),微量元素和稀土元素(10^{-6})组成
Table 2 Geochemical composition of the metamorphic rocks basement of the Xiangshan uranium orefield
(major elements: %, trace elements: 10^{-6})

分析项目	库里组			神山组								PAAS 页岩	
	变砂岩	千枚岩	D0142.2	绢云石英片岩			千枚岩			变砂岩			
				D0144.2	D0143	D3671.2	D3675.2	D3007.2	D3670.6	D3672.2	D3673.1		D3675.1
SiO ₂	76.95	66.45	63.09	59.52	67.52	54.27	63.14	65.01	67.89	62.86	70.45	66.76	62.8
Al ₂ O ₃	11.23	16.19	17.88	19.71	15.03	18.49	16.83	16.59	14.49	18.46	14.19	15.74	18.9
Fe ₂ O ₃	1.13	1.67	1.82	2.86	2.91	1.72	2.12	2.21	1.39	2.96	1.86	1.39	6.50
FeO	3.18	5.02	5.62	3.68	3.45	5.88	4.65	3.98	3.97	2.95	2.78	4.48	
MgO	1.38	2.23	2.24	2.62	2.04	3.15	2.81	2.56	2.06	2.32	1.86	2.23	2.20
CaO	0.20	0.33	0.60	0.25	0.24	1.74	0.47	0.17	1.61	0.09	0.39	0.010	1.30
Na ₂ O	1.53	1.01	1.78	0.96	2.11	1.57	0.83	0.47	1.99	0.06	1.44	2.23	1.20
K ₂ O	2.19	3.68	3.46	4.70	2.28	4.34	4.00	3.89	2.94	4.37	3.08	2.56	3.70
TiO ₂	0.54	0.77	0.84	1.01	0.78	1.17	0.83	0.87	0.67	0.98	0.76	0.80	1.00
MnO	0.05	0.09	0.13	0.04	0.08	0.14	0.07	0.04	0.09	0.05	0.07	0.034	0.11
P ₂ O ₅	0.08	0.13	0.31	0.19	0.11	0.29	0.18	0.14	0.16	0.06	0.17	0.14	0.16
烧失量	1.41	2.09	1.84	4.21	3.27	6.53	3.76	3.82	2.39	4.69	2.82	3.32	
B	94.09	78.68	38.93	107.75	29.37	150.74	62.97	92.87	47.96	75.31	67.61	26.50	650
F	310.05	556.47	530.01	571.74	267.87	620.10	486.01	476.19	427.34	385.06	424.45	638.00	
Ba	261.25	367.60	363.60	1160.0	515.80	683.20	996.80	985.90	730.70	1132.0	697.95	426.00	
V	76.66	131.00	127.30	145.30	103.90	154.55	117.00	120.00	100.90	157.30	117.50	91.40	
Cr	61.70	90.22	97.46	97.63	76.30	105.11	71.47	73.37	62.43	95.16	69.59	81.50	
Zr	196.39	187.81	186.55	297.09	213.75	295.98	229.82	218.34	208.70	196.40	207.70	231.00	210
Sc	11.42	20.90	23.23	20.85	14.28	22.53	15.69	17.41	13.36	22.76	15.87	16.30	16.00
Sr	47.94	64.79	64.07	77.32	62.67	158.15	141.10	59.85	289.40	63.14	134.60	51.70	200
Ga	15.34	21.75	21.59	25.74	19.36	26.89	22.31	21.73	18.71	25.24	18.25	21.00	
Li	28.78	53.34	52.96	65.62	34.23	53.66	59.90	54.70	44.77	50.97	42.72	34.00	
Be	1.40	2.47	2.11	3.26	1.77	3.13	3.16	2.76	2.23	2.79	2.23	1.98	
Co	12.23	19.99	18.06	23.88	17.94	27.16	20.30	20.69	18.24	14.96	9.94	14.70	
Ni	20.87	37.17	38.01	49.33	37.89	65.42	38.43	46.96	40.14	45.95	29.05	43.40	55.00
Cu	31.49	45.73	10.20	49.47	29.43	38.90	34.26	44.72	38.63	43.25	17.44	21.00	
Zn	50.27	66.54	62.12	137.60	96.50	139.20	132.00	132.70	110.00	143.90	101.90	109.00	
Rb	62.83	72.45	73.62	49.13	47.67	62.94	74.30	55.54	47.46	61.17	52.58	114.00	160.00
Nb	7.17	12.04	13.20	15.53	10.59	15.01	11.23	11.75	9.56	13.99	11.05	18.90	19.00
Th	11.43	15.70	17.62	15.70	8.36	18.16	12.86	14.14	10.17	12.44	12.45	11.50	14.6
U	2.31	2.82	3.45	3.32	1.69	3.22	2.64	2.70	1.97	2.41	1.99	1.85	3.1
Y	18.68	33.13	45.65	33.70	26.20	38.44	30.26	26.67	22.60	37.78	15.94	26.50	27
La	25.88	35.12	50.92	47.54	40.03	49.71	42.66	48.72	34.69	49.05	25.60	34.7	38
Ce	53.09	73.72	105.63	94.48	36.65	102.77	90.70	79.71	64.37	55.53	63.66	69.9	80
Pr	5.69	7.86	11.38	11.18	9.55	11.27	10.18	11.21	7.64	12.52	5.61	8.59	8.83
Nd	24.07	33.11	49.78	45.89	40.21	47.79	42.69	44.28	31.96	53.82	22.85	32.7	33.9
Sm	5.26	7.15	11.15	9.10	7.93	9.83	8.44	8.48	6.45	11.01	4.32	6.77	5.60
Eu	1.09	1.41	1.99	1.93	1.82	2.04	1.86	1.80	1.52	2.32	0.98	1.57	1.10
Gd	4.16	5.76	9.04	7.19	5.83	7.91	6.72	6.52	5.25	8.15	3.54	5.86	4.66
Tb	0.71	1.06	1.61	1.20	0.96	1.33	1.11	1.07	0.86	1.34	0.57	0.89	0.77
Dy	3.88	6.32	9.12	6.56	5.08	7.52	6.02	5.67	4.66	7.11	3.17	5.04	4.40
Ho	0.75	1.28	1.78	1.28	0.97	1.48	1.15	1.07	0.88	1.40	0.62	0.96	0.99
Er	2.25	3.87	5.24	3.79	2.87	4.44	3.38	3.11	2.57	4.14	1.98	2.68	2.85
Tm	0.34	0.58	0.74	0.55	0.41	0.64	0.50	0.44	0.36	0.59	0.30	0.39	0.40
Yb	2.23	3.68	4.59	3.38	2.47	4.00	3.08	2.79	2.32	3.56	2.01	2.56	2.80
Lu	0.32	0.51	0.61	0.46	0.33	0.54	0.42	0.39	0.32	0.49	0.29	0.37	0.43
ΣREE	129.71	181.43	263.58	234.51	155.10	251.25	218.88	215.26	163.86	211.02	135.51	172.98	185
LREE	115.08	158.37	230.85	210.11	136.19	223.40	196.52	194.20	146.63	184.25	123.03	154.23	167.7
HREE	14.63	23.06	32.73	24.40	18.91	27.85	22.37	21.06	17.23	26.77	12.48	18.75	17.3
LREE/HREE	7.87	6.87	7.05	8.61	7.20	8.02	8.79	9.22	8.51	6.88	9.85	8.23	9.68
La _N /Yb _N	8.33	6.84	7.95	10.08	11.63	8.92	9.94	12.53	10.73	9.87	9.15	9.72	8.81
δEu	0.69	0.65	0.59	0.70	0.78	0.68	0.73	0.71	0.78	0.72	0.74	0.74	0.66

中(图4-b)神山组主要落在Ⅲ和Ⅳ区,分别代表原岩为复矿物砂岩和长石砂岩;库里组主要落在Ⅱ区和Ⅳ区,其原岩为少量矿物砂岩、石英岩质砂岩区及长石砂岩;上施组大部分样品投点在Ⅳ区——长石砂岩区,1个样品在Ⅺ硅质泥灰岩和含铁砂岩区,对应于样品D2311岩性为黑云石英大理岩,1个落在Ⅵ化学上弱分异的沉积物区泥质砂岩及寒带和

温带气候的陆相粘土。综合地球化学研究可知,测区内的变质岩原岩以陆源碎屑为主,分异程度较差,岩石成熟度低。

4 形成环境探讨

4.1 源区物质组成特征

尽管碎屑沉积岩的化学组成受到源区岩石组

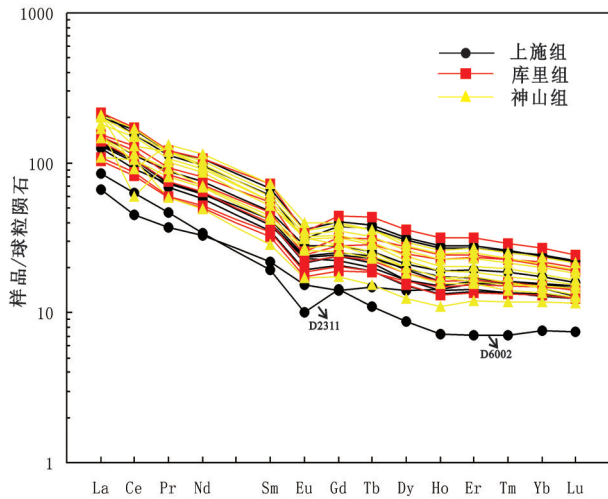


图3 相山基底变质岩稀土元素分布模式图
(球粒陨石标准化值据[14])

Fig.3 Chondrite-normalized REE patterns of the metamorphic rocks basement of the Xiangshan uranium orefield

成以及一些外生地质作用的影响,如化学风化作用、搬运分选作用、沉积成岩作用及区域变质作用,但碎屑沉积岩的地球化学研究仍被广泛应用到解

释源区的矿物组成及其风化作用特征等研究领域^[17-18]。锆石中富含Zr,而Th和Sc都难溶于自然水,且在沉积循环过程中不发生分馏作用,所以在沉积循环过程中,随着锆石的富集,Zr/Sc将升高而Th/Sc比值不变^[19]。相山基底变质岩的Th/Sc(0.5~1.1)比值变化范围较小、而Zr/Sc(8~24)比值变化范围较大,揭示了该区变质碎屑岩的源区成分可能经过多次沉积循环,其物源较复杂。因此,利用主量或微量元素的变化来分析源区特征可能会有所误差。由于稀土元素含量在碎屑沉积岩中是稳定的,受风化、成岩及变质作用的影响不明显^[20],因而可以对碎屑沉积物的成因提供重要的约束。从Hf-La/Th图解中(图5)可以看出库里组大部分落入酸性岛弧区域,揭示其库里组源区物质可能以酸性岛弧火成岩为主。神山组和上施组物源区主要为被动大陆边缘更老物质成分,而到目前为止还没有确凿的证据证明武夷地区存在太古宙结晶基底,因此神山组和上施组的物源很可能来源于古一中元古代地层的抬升剥蚀,库里组物源区主要与酸性岛弧火成岩有关。在3个组的变质碎屑沉积岩样品具有明显

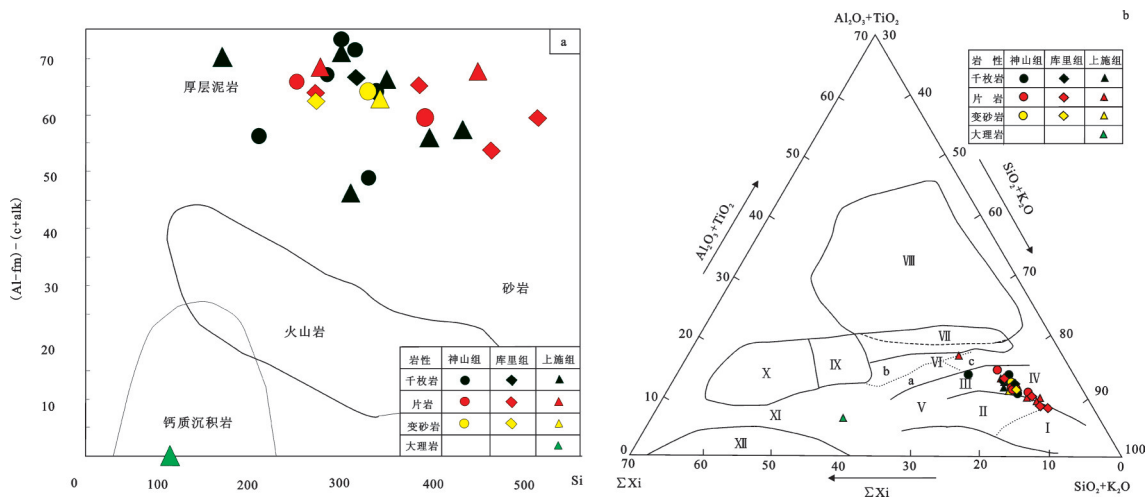


图4 岩石类型判别图解

a—研究区变质岩(al+fm)-(c+alk)-Si图解^[16]; b—(Al₂O₃+TiO₂)-(SiO₂+K₂O)-Σ其余组分图解^[17]
I—石英砂岩; II—少量矿物砂岩、石英质砂岩区; III—复矿物砂岩; IV—长石砂岩; V—钙质砂岩和含铁砂岩区; VI—化学上弱分异的沉积物区(a—主要为杂砂岩; b—主要为复矿物粉砂岩; c—泥质砂岩及寒带和温带气候的陆相粘土); VII—化学上中等分异的粘土、寒带和温带气候的海相和陆相粘土区; VIII—潮湿气候带化学强分异的粘土区; IX—碳酸盐粘土和含铁粘土区; X—泥灰岩区; XI—硅质泥灰岩和含铁砂岩区; XII—含铁石英岩(碧玉铁质岩)区

Fig. 4 Discrimination of rock types

a—Simonen diagram^[16]; b—Diagram of (Al₂O₃+TiO₂)-(SiO₂+K₂O)-Σ other components for metamorphic rocks of the study area^[17]
I—Quartz sandstone; II—Quartz sandstone with minor amounts of other minerals or quartzite sandstone; III—Complex mineral sandstone; IV—Feldspathic sandstone; V—Calcareous sandstone and iron-rich sandstone; VI—Weak chemical weathering (a—Mainly greywacke; b—Complex mineral siltstone; c—Argillaceous sandstone and continental clay from boreal and temperate climate zones); VII—Medium chemical weathering of clay from boreal and temperate climate zones of marine and terrestrial areas; VIII—Strong chemical weathering of clay from humid climate zones; IX—Carbonate clay and iron-rich clay; X—Marl; XI—Siliceous marl and iron sandstone; XII—Iron-rich quartzite (jaspilite)

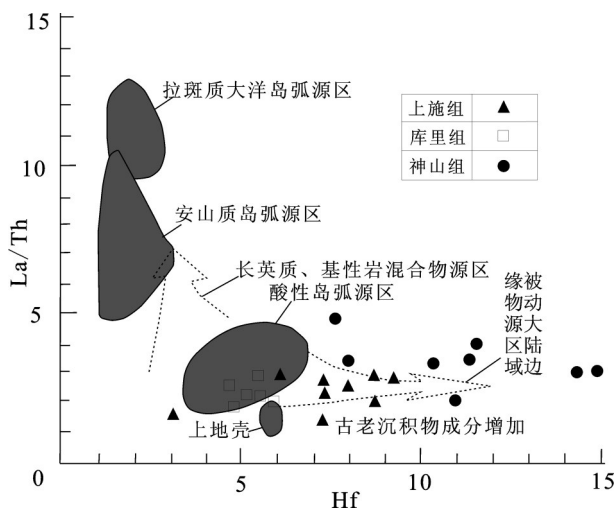


图5 相山地区基底变质岩源区物质组成Hf-La/Th图解^[21]
Fig.5 The source composition discrimination for metamorphic rocks of the Xiangshan uranium orefield^[21]

的负Eu异常($Eu/Eu^*=0.59\sim 0.85$),具有后太古宙沉积物的特征^[14],说明其源区物质都经历了壳内的地球化学分异作用。

4.2 构造背景

由于碎屑沉积岩的地球化学特征主要取决于其物质组成,而物质组成又与其物源和大地构造环境有着非常密切的关系,因此碎屑沉积岩地球化学数据可以用来恢复构造背景^[22-23]。基于澳大利亚东部古生代浊积岩系列的研究,Bhatia认为碎屑沉积岩的主量元素可以反映其成因及构造背景^[24]。通常,从大洋岛弧—大陆岛弧—活动大陆边缘—被动大陆边缘的砂岩, $Fe_2O_3^T+MgO$ 、 TiO_2 和 Al_2O_3/SiO_2 比值减小, K_2O/Na_2O 、 $Al_2O_3/(CaO+Na_2O)$ 增加。在 SiO_2-K_2O/Na_2O 和 $TiO_2/Fe_2O_3^T+MgO$ 图解^[25]中(图6-a,b),样品主要落入了和活动大陆边缘区和大陆边缘弧,显示构造类型较复杂。为了更准确地对比分析,笔者选取相山基底变质中的砂质含量较高的变质砂岩和石英片岩(表1)进行分析, $Fe_2O_3^T+MgO$ 含量介于6%~10%(平均8.01%); TiO_2 含量介于0.54%~1.01%(平均0.74%); Al_2O_3/SiO_2 比值介于0.15~0.33(平均0.22); K_2O/Na_2O 比值介于0.72~10.60,除了样品D0149.1、D3671.2和D0138.1中 Na_2O 含量极低(可能发生了钠离子的迁出)外,大部分样品 K_2O/Na_2O 比值介于0.72~2.51(平均1.39);去除这3个 Na_2O 的偏移值的样品, $Al_2O_3/$

($CaO+Na_2O$)比值介于4.42~9.26(平均6.49)。其 $Fe_2O_3^T+MgO$ 、 TiO_2 含量和 Al_2O_3/SiO_2 比值与大陆岛弧相似,而 K_2O/Na_2O 、 $Al_2O_3/(CaO+Na_2O)$ 比值接近被动大陆边缘,考虑到受沉积再循环作用影响,Na易被淋滤而K易被吸附, K_2O/Na_2O 、 $Al_2O_3/(CaO+Na_2O)$ 比值反映不一定可靠,因此这套变质沉积岩可能形成于大陆岛弧环境。

Bhatia^[24]文中的活动大陆边缘指安第斯型的活动陆缘(continental margin of Anden type),不是广义的活动大陆边缘,不包括大陆岛弧(如日本弧)。因此,为了进一步区分这套浅变质碎屑沉积岩的形成环境,使用不活泼的微量元素进行分析研究,如Th-Sc-Zr/10和La-Th-Sc图解^[22]。在这2个图解中(图6-c,d),大部分数据落入大陆岛弧区,说明该套岩石可能沉积于靠近大陆岛弧的相关盆地。这种构造环境下形成的碎屑沉积物,主要来自长英质岩浆岩或火山岩。因此,相山基底变质碎屑沉积岩的地球化学特征指示靠近大陆岛弧的活动大陆边缘构造环境,如弧后盆地、弧间盆地等。

4.3 沉积环境简析

神山组下段原岩主要为复矿物砂岩和长石砂岩,显示砂质成分较多的特点,上段表现为泥、砂互层组合特征,成分组成中含有较多长石及岩屑,并且可见变余水平层理发育,显示快速沉积特征,推测其形成于次深海—陆棚边缘相带。库里组原岩主要为石英岩质砂岩、长石砂岩夹少量矿物砂岩。总体显示物源充足、水体相对稳定的陆棚碎屑岩沉积。上施组原岩主要为长石砂岩夹少量的硅质泥灰岩和泥质砂岩,局部地区可见平行层理、斜层理等沉积构造,属陆棚斜坡相浊流沉积。根据沉积物质组合及沉积构造,并结合岩石地球化学特征分析,相山基底变质沉积碎屑岩为形成于大陆边缘岛弧构造背景下的一套滨海—次深海环境的含有火山物质的陆缘碎屑建造组合体。

5 相山基底变质岩原岩形成之构造环境探讨

华南由扬子和华夏2个地质构造单元组成,对这一构造属性的认识已趋于一致,但对其构造演化的具体过程仍存在不同认识,特别是新元古代扬子与华夏两陆块的碰撞演化性质及拼接时限。大量

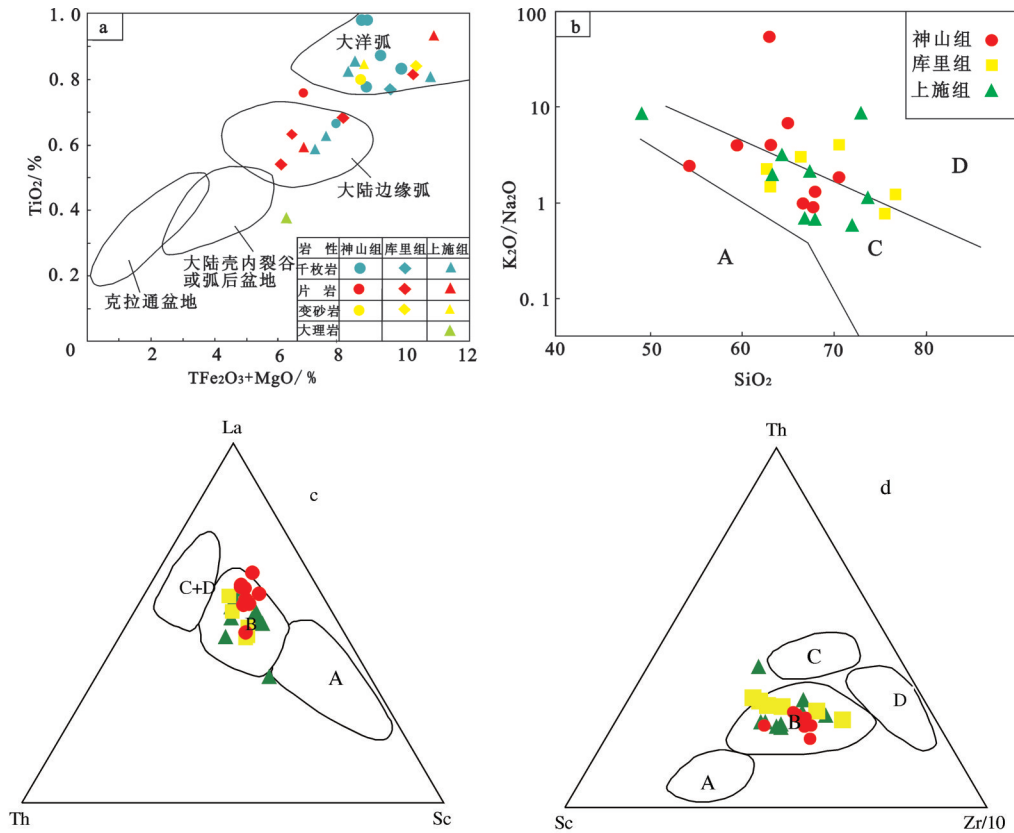


图6 研究区浅变质碎屑岩构造环境图解(底图据[22])
构造环境缩写:A—大洋岛弧;B—大陆岛弧;C—活动大陆边缘;D—被动大陆边缘

Fig.6 Discrimination diagrams of tectonic setting for low metamorphic clastic sedimentary rocks from the Xiangshan uranium orefield(after reference [22]). Abbreviation for tectonic settings: A—Oceanic island arc; B—Active continental margin; C—Continental arc; D—Passive continental margin

研究成果^[4, 26]表明中元古代末至新元古代初的“晋宁—四堡”运动使华夏地块与扬子克拉通碰撞, 新元古代岛弧岩浆活动时间为878~822 Ma, 期间岩浆活动和沉积作用同时发生^[27], 华夏地块与扬子克拉通碰撞后, 约820 Ma地壳发生伸展^[3, 5]。杨明桂等通过区域对比, 认为赣中地区新元古代变质岩为华南裂谷系中的南华海盆沉积产物^[28]。张芳荣等通过分析赣中南新元古代潭头群(神山组和库里组)变质沉积岩的地球化学特征, 认为其构造背景属于新元古代华夏陆块和扬子陆块的俯冲碰撞有关的岛弧环境^[29]。胡恭任等认为赣中地区结晶基底(含十字石榴)云母片岩形成于岛弧环境, 褶皱基底(千枚岩、变质砂岩等)形成于活动大陆边缘环境。从相山地区两种岩性区域分布和岩性特征以及原岩恢复来看, 该区域变质岩成层有序, (含十字石榴)云母片岩仅在有限

的地区分布, 与千枚岩、变质砂岩等原岩特征一致, 应该为同一套岩性。这些变质岩的地化特征也从另一方面表明了其原岩形成于与活动大陆边缘有关的岛弧环境。本次研究对该区域变质碎屑沉积岩的地球化学特征分析也表明其原岩形成于靠近大陆岛弧的活动大陆边缘构造环境(弧后盆地、弧间盆地等)。

相山基底变质碎屑岩的Hf-La/Th图解中表明其原岩的物源很可能大部分来源于古老地层的抬升剥蚀, 酸性岛弧源区仅占少数, 说明该时期岩浆活动并不明显, 其物源区伴有构造隆升。根据目前所测该区变质碎屑沉积岩中碎屑锆石年龄推测其沉积期应为800~810 Ma(据江西省陀上幅、乐安县幅、鹿冈幅1:5万区域地质调查报告, 未发表), 其沉积发生在华夏地块与扬子克拉通碰撞后, 变质岩原

岩可能为后碰撞造山期沉积,同时沉积期物源区构造隆升作用明显。推测这套变质岩原岩沉积应为地壳发生伸展之后,此时的沉积盆地应是2个板块在碰撞过程中没有闭合的继承性海盆,与中国西南晚三叠世三江地区沉积盆地和青藏高原古近纪沉积盆地性质相似^[30]。这一构造环境与相山基底碎屑变质沉积岩的地化特征所反映的与活动大陆边缘有关的岛弧构造环境相一致。在这一海盆中发育由岩浆活动形成的岛弧,而此时期岩浆活动逐渐减弱。在后碰撞伸展环境下,同时形成了一套碎屑复理石建造(神山组、库里组和上施组),其沉积物不仅表现为单调互层的泥砂质巨厚沉积体系,且具石英含量较低,成分、结构成熟度低的沉积特征。据此推测青白口纪晚期,赣中地区沉积构造环境处于扬子板块与华夏地块之间的残留海盆。

6 结 论

(1)微古化石资料和前人研究表明相山铀矿田基底变质岩原岩时代为新元古代青白口纪,神山组原岩主要为复矿物砂岩和长石砂岩,库里组原岩主要为石英岩质砂岩及长石砂岩;上施组原岩主要为长石砂岩及少量硅质泥灰岩、泥质砂岩;这套变质碎屑沉积岩形成于滨浅海-陆棚沉积环境。

(2)所有样品中Th/Sc比值变化范围较小(0.5~1.1),而Zr/Sc比值变化范围较大(8~24),揭示了变质岩源区成分复杂,可能经过多次沉积循环。Hf-La/Th图解表明原岩的物源大部分来源于古老地层的抬升剥蚀,酸性岛弧源区仅占少数,神山组和上施组的物源很可能来源于古一中元古代地层的抬升剥蚀,库里组物源区主要与酸性岛弧火成岩有关。

(3)在Th-Sc-Zr/10和La-Th-Sc图解中,大部分数据落入大陆岛弧区,说明该套岩石可能沉积于靠近大陆岛弧的相关盆地,推测赣中相山基底变质岩原岩形成于华夏地块与扬子板块后碰撞伸展环境下的残留海盆。

致谢:审稿专家及编辑部杨艳老师对论文提出了宝贵修改意见,在此一并致以诚挚的谢意!

参考文献(References):

[1] Zhang Guowei, Guo Anlin, Wang Yuejun, et al. Tectonics of South China continent and its implications[J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2013, 56: 1804-1828.

- [2] Zhang Jin, Li Jin, Xiao Wenxia et al. Multistage deformation in the northeastern segment of the Jiangshao Fault (Suture) Belt: Constraints for the relationship between the Yangtze Plate and the Cathaysia Old Land[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 87(4): 948-978.
- [3] 殷鸿福, 吴顺宝, 杜远生, 等. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 1999, 24(1): 1-12.
Yin Hongfu, Wu Shunbao, Du Yuansheng, et al. South China defined as part of Tethyan archipelagic ocean system[J]. *Earth Science——Journal of China University of Geosciences*, 1999, 24(1): 1-12 (in Chinese with English abstract).
- [4] 王剑, 刘宝珺, 潘桂棠. 华南新元古代裂谷盆地演化—Rodinia超大陆解体的前奏[J]. *矿物岩石*, 2001, 21(3): 135-145.
Wang Jian, Liu Baojun, Pan Guitang. Neoproterozoic rifting history of South China significance to Rodinia breakup[J]. *Mineral Petrol.* 2001, 21(3): 135-145(in Chinese with English abstract).
- [5] 尹福光, 万方, 陈明. 泛华夏大陆群东南缘多岛弧盆系统[J]. *成都理工大学学报*, 2003, 30(2): 126-131.
Yin Fuguang, Wan Fang, Chen Ming. The multi-arc basin system on the south-eastern Margin of the Pan-Cathaysian continental group[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2003, 30(2): 126-131 (in Chinese with English abstract).
- [6] 舒良树. 华南构造演化的基本特征[J]. *地质通报*, 2012, 31(7): 1035-1053.
Shu Liangshu. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block[J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(7): 1035-1053 (in Chinese with English abstract).
- [7] 章邦桐, 胡恭任, 王湘云, 等. 相山地区变质基底新认识及其原岩归属的对比研究[J]. *铀矿地质*, 1997, 13(1): 1-7.
Zhang Bangtong, Hu Gongren, Wang Xiangyun, et al. New recognition on the metamorphic basement in Xiangshan area and the comparative study on attribution of its original rocks[J]. *Uranium Geology*, 1997, 13(1): 1-7 (in Chinese with English abstract).
- [8] 胡恭任, 刘丛强, 于瑞莲. 赣中变质岩带地质地球化学演化特征[J]. *地球学报*, 2006, 27(1): 35-42.
Hu Gongren, Liu Congqiang, Yu Ruilian. Geological and geochemical evolution characteristics of the metamorphic belt in central Jiangxi[J]. *Acta Geoscientifica Sinica*, 2006, 27(1): 35-42 (in Chinese with English abstract).
- [9] 陈正乐, 王永, 周永贵, 等. 江西相山火山-侵入杂岩体锆石SHRIMP定年及其地质意义[J]. *中国地质*, 2013, 40(1): 217-231.
Chen Zhengle, Wang Yong, Zhou Yonggui, et al. SHRIMP U-Pb dating of zircons from volcanic-intrusive complexes in the Xiangshan uranium ore field, Jiangxi Province, and its geological implications[J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 217-231(in Chinese with English abstract).
- [10] Xiang Lei, Shu Liangshu. Pre-Devonian tectonic evolution of the eastern South China Block: Geochronological evidence from detrital zircons[J]. *Science in China(Earth Sciences)*, 2010, 53

- (10): 1427–1444.
- [11] 江西省地质调查研究院. 1:25 万区域地质调查报告(抚州市幅)[R]. 中国地质调查局, 2007: 12–26.
Jiangxi Institute of Geolocial Survey. 1: 250000 Geological Survey Report (Fuzhou City)[R]. China Geolocial Survey Bureau, 2007: 12–26.
- [12] 章邦桐, 胡恭任. 赣中存在中元古代变质基底的岩石地球化学证据及其地质意义[J]. 高校地质学报, 2006, 12(4): 466–474.
Zhang Bangtong, Hu Gongren. The geochemical evidences for existence of Mesoproterozoic metamorphic basement in central Jiangxi Province[J]. Geological Journal of China Univesities, 2006, 12(4): 466–474 (in Chinese with English abstract).
- [13] 胡恭任, 章邦桐, 王长华. 赣中相山新元古代变质岩的首次确定[J]. 中国区域地质, 1996, 16(2): 222–224.
Hu Gongren, Zhang Bangtong, Wang Changhua. First determination of the Neoproterozoic metamorphic rocks in Xiangshan, central Jiangxi Province[J]. Regional Geology of China, 1996, 16(2): 222–224(in Chinese with English abstract).
- [14] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985: 1–39.
- [15] 王仁民, 贺高品, 陈珍珍, 等. 变质岩原岩图解鉴别法[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 150–162.
Wang Renmin, He Gaopin, Chen Zhenzhen, et al. Graphic Method for Protolith Metamorphic Rocks[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 39–41(in Chinese).
- [16] Simonen A J P. Stratigraphy and sedimentation of the Svecofennidic, Early Archean supracrustal rocks in southwestern Finland[J]. Bulletin de la Commission Geologique de Finlande, 1953, 160: 1–64.
- [17] Nesbitt H W, Young C M. Early Proterozoic climates and plate motion inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 1982, 199: 715–717.
- [18] Joo Y J, Lee Y, Bai Z Q. Provenance of the Qingshuijian Formation (Late Carboniferous), NE China: Implications for tectonic processes in the northern margin of the North China block[J]. Sedimentary Geology, 2005, 177(1/2): 97–114.
- [19] Cullers R L. The chemical signature of source rocks in size fractions of Holocene stream sediment derived from metamorphic rocks in the Wet Mountains region, Colorado, U. S. A[J]. Chemical Geology, 1994, 113: 327–343.
- [20] Nance W B, Taylor S R. Rare earth element patterns and crustal evolution I: Australian post- Archean sedimentary rocks[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1976, 40: 1539–1551.
- [21] Floyd P A, Leveridge B E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstone[J]. Journal of the Geological Society of London, 1987, 144: 531–542.
- [22] Bhatia M R, Crook A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1986, 92: 181–193.
- [23] McLennan S M, Taylor S R. Sedimentary rocks and crustal evolution: Tectonic setting and secular trends[J]. Journal of Geology, 1991, 99(1): 1–21.
- [24] Bhatia M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstone[J]. Jour. Geol., 1983, 91: 611–712
- [25] Roser B P, Korsch R J. Determination of tectonic setting of sandstone– mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio[J]. Journal of Geology, 1986, 94: 635–650.
- [26] 杨明桂, 刘亚光, 黄志忠, 等. 江西中新元古代地层的划分及其邻区对比[J]. 中国地质, 2012, 39(1): 49–50.
Yang Minggui, Liu Yaguang, Huang Zhizhong, et al. Subdivision of Meso–Neoproterozoic strata in Jiangxi and a correlation with the neighboring areas[J]. Geology in China, 2012, 39(1): 49–50 (in Chinese with English abstract).
- [27] 周金城, 王孝磊, 邱检生. 江南造山带形成过程中若干新元古代地质事件[J]. 高校地质学报, 2009, 15(4): 453–459.
Zhou Jincheng, Wang Xiaolei, Qiu Jiansheng. Some Neoproterozoic geological events involved in the development of the Jiangnan Orogen[J]. Geological Journal of China Universities, 2009, 15(4): 453–459 (in Chinese with English abstract).
- [28] 杨明桂, 祝平俊, 熊清华, 等. 新元古代–早古生代华南裂谷系的格局及其演化[J]. 地质学报, 2012, 86(9): 1367–1375.
Yang Minggui, Zhu Pingjun, Xiong Qinghua, et al. Framework and evolution of the Neoproterozoic– Early Paleozoic South–China Rift system[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(9): 1367–1375 (in Chinese with English abstract).
- [29] 张荣芳, 吴富江, 黄新曙. 赣中南新元古代潭头群变质沉积岩物源及构造背景[J]. 东华理工大学学报, 2009, 32(2): 134–140.
Zhang Rongfang, Wu Fujiang, Huang Xinshu. The source and tectonic setting of Neoproterozoic metasedimentary rocks from Tantou Group in the Central– south of Jiangxi Province[J]. Journal of East China Institute of Technology, 2009, 32(2): 134–140(in Chinese with English abstract).
- [30] 侯增谦, 曲晓明, 杨竹森, 等. 青藏高原碰撞造山带: 后碰撞伸展成矿作用[J]. 矿床地质, 2006, 25(6): 629–647.
Hou Zengqian, Qu Xiaoming, Yang Zhusen, et al. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: Mineralization in postcollisional extension setting[J]. Mineral Deposits, 2006, 25 (6): 629–647 (in Chinese with English abstract).