

文章编号: 0379-1726(2004)02-0118-13

赣中变质岩带变泥砂质岩石地球化学特征及其地质意义

胡恭任^{1,2,3}, 刘丛强¹, 章邦桐³, 唐红峰¹

(1. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002; 2. 华侨大学环境科学与工程系, 福建 泉州 362011; 3. 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 江苏 南京 210093)

摘要: 赣中变质岩带主要由变泥砂质岩石和少量斜长角闪岩组成。30 个变泥砂质岩石样品分析表明, 稀土元素分布模式显示明显富集轻稀土元素及 Eu 负异常 [$\Sigma \text{REE} = 129 \sim 296 \mu\text{g/g}$, $\delta\text{Eu} = 0.51 \sim 0.86$, $(\text{La}/\text{Yb})_n = 3.95 \sim 12.9$], 其不相容元素比值高 ($\text{Th}/\text{Sc} = 0.57 \sim 3.59$, $\text{La}/\text{Sc} = 1.46 \sim 12.4$, $\text{La}/\text{Yb} = 5.84 \sim 19.0$, $\text{La}/\text{Sm} = 4.69 \sim 6.87$, $\text{Th}/\text{U} = 3.40 \sim 6.42$), 大离子亲石元素富集, Zr、Hf、Sc、Ti、Y、HREE 和 Sr 含量较低, 其原岩应为一套砂泥质岩石, 沉积于远离陆地的克拉通大陆架浅海环境; $\delta\text{Ba} = 0.10 \sim 0.93$, Nd 同位素亏损地幔模式年龄 $t_{\text{DM}} = 1597 \sim 2525 \text{ Ma}$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(0) = -9.9 \sim -15.8$, 其源区物质主体由古元古代富铝富钾的花岗质岩石和(或)碎屑沉积岩构成, 经历了较强的化学风化作用。

关键词: 变泥砂质岩石; 地球化学; Nd 同位素; 变质岩带; 江西省**中图分类号:** P594 **文献标识码:** A

0 引言

在武夷山以西, 赣中乐安-临川-金溪-鹰潭境内, 沿北东方向出露一条宽 20 多千米、长百余千米的中深变质岩带(图 1), 这套岩系经历了多期复杂变形和角闪岩相变质, 长期以来缺乏专门的研究。

作者近年来曾对赣中乐安相山变质岩基底的矿物岩石学及同位素年代学进行了初步研究, 有一系列新的发现和认识^[1-4]。由于该变质岩带位于扬子地块、华夏地块与华南加里东造山褶皱带的接合部位, 且构成相山铀矿田、盛源铀矿田、90 号铀矿床的火山岩基底, 因此对该变质岩系的原岩成分、成因环境及其物源区地质演化规律的研究, 对进一步认识该区的地壳演化和铀等金属成矿作用具有重要意义。本文拟通过详细的野外地质调查研究和室内分析鉴定, 从地质、地球化学和元素地球化学角度分析, 对该变质岩带的原岩成分、成因环境及其物源区地质演化规律进行系统的研究。

1 地质及岩相学

赣中变质岩带主要由变泥砂质岩石和少量斜长角闪岩组成, 区域上主要分布于鹰潭-南城断裂以西, 过南城岳口成东西向经临川茅排、宜黄黎溪转到相山矿田北部贯下-戴家村一线以北(图 1); 按矿物种类、含量及结构构造, 赣中变质岩带变泥砂质岩石可进一步划分为黑云(石英)片岩、二云(石英)片岩、夕线石片岩、十字石榴云母(石英)片岩、石榴云母(石英)片岩和斜长云母变粒岩等不同类型。以普遍含有云母类矿物为特征, 富泥质岩石中云母含量最高可达 70% 以上。长英质矿物为石英和斜长石, 主要分布于变粒岩中, 其比例存在较大变化。空间上, 不同类型变泥砂质岩石以不同尺度互层产出(从几个厘米到数十米), 其相互比例在不同地方可有较大变化。斜长角闪岩成条带状和透镜状出于余江马荃毛家和乐安相山马口一带的石榴云母片岩中, 厚度数米到数十米。

收稿日期: 2003-07-29; **接受日期:** 2003-10-24**基金项目:** 国家自然科学基金(40272038); 科技部攀登计划预选项目(95-预-39); 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室开放基金; 华侨大学博士科研启动资金资助**作者简介:** 胡恭任(1966-), 男, 博士、副研究员, 主要从事资源环境与同位素地球化学方面的教学与科研工作; 第二单位为作者联系单位。E-mail: grhu@hqu.edu.cn

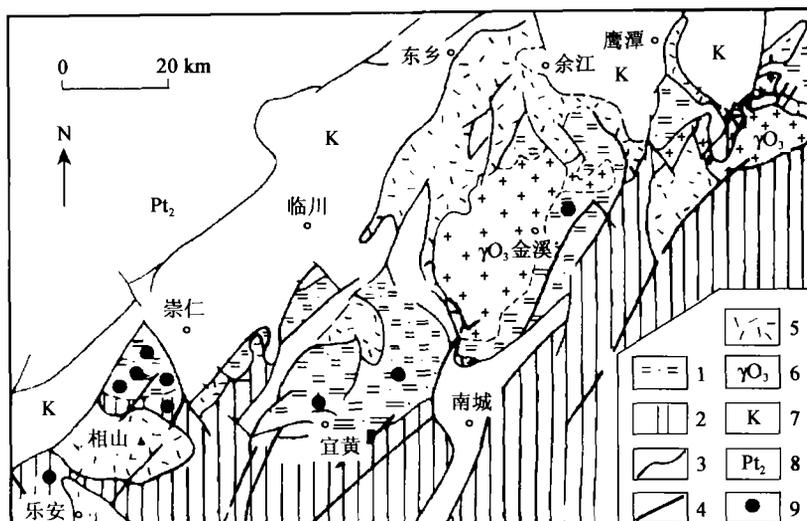


图 1 赣中变质岩带变质岩系分布示意图

Fig. 1 Distribution sketch map of metamorphic rocks of the metamorphic rock belt in central Jiangxi Province

1. 赣中变质岩带; 2. 新元古代地层; 3. 地质界线; 4. 断裂; 5. 中生代火山岩; 6. 加里东期花岗岩; 7. 白垩纪红层;
8. 扬子地块双桥山群; 9. 取样位置。

2 样品采集及分析方法

本次研究采集的样品遍及赣中变质岩带不同岩石类型的各个部位(图 1), 分布在乐安-临川-金溪-鹰潭境内, 沿北东方向宽 20 多千米、长 80 余千米的范围内。

在详细的岩石薄片观察的基础上, 挑选出新鲜的不同岩石类型的样品进行主元素、微量元素分析, Sm-Nd 同位素样品是在微量元素样品的基础上进一步挑选出来的。主元素由南京大学地球科学系中心实验室采用湿法分析。稀土等微量元素由中国科学院地球化学研究所等离子体质谱室完成, 样品采用 HF + HNO₃ 密闭溶样, 在 ICP-MS 上测定, 分析时外加标准样 GSB-3 和 BCR-1 作为质量监控, 稀土元素的精度优于 5%, 其余元素优于 10%。Sm-Nd 同位素由核工业北京地质研究院分析中心质谱室完成, 样品经 HClO₄ + HF 混合酸分解后转化为氯化物, 用阳离子交换法从样品溶液中分离出总稀土元素, 所用树脂为 Dowe × 50 × 8, 富集的总稀土元素再用树脂 AG50U-x8 以 pH = 4.65 的 α-羟基异丁酸为淋洗液在加压毛细管柱中分离出 Sm、Nd 同位素, 所用质谱仪为 VG354。Nd 同位素比值测定以 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.721 9 为标准化值, 对 BCR-1, La Jolla 标样 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 的测定值分别为 0.512 164 ± 4 (2σ)、0.511 860 ± 4 (2σ), 实验全流程 Sm、Nd 空白本底分别为 4.7 × 10⁻⁹ g、4.7 × 10⁻¹⁰ g, 详细测试过程见文

献[5, 6]。

3 原岩类型及地球化学

在 K-A 图解^[7](图略)上, 所有样品均投在沉积岩区; 在尼格里值 [(al + fm) - (c + alk)] - Si 图解(图 2a)^[8]上, 样品点落入泥质-砂质沉积岩区; 在 ACF^[12](图略)和 (Al + ΣFe + Ti) - (Ca + Mg) 图解(图 2b)^[9]上, 样品点均落入火山岩区之外的粘土、泥岩、粉砂岩和页岩区内; 在 SiO₂/Al₂O₃ - (CaO + Na₂O)/K₂O^[13]图解(图略)上, 样品点落入泥质-砂质沉积岩区; 在巴拉绍夫的稀土元素 La/Yb - ΣREE 图解(图 2c)^[10]上, 样品点落入砂质岩和杂砂岩与页岩和粘土岩的重叠区; 在 K₂O-TFe₂O₃-Al₂O₃ 图解(图 2d)^[11, 14]上, 样品点主要落在残余粘土与北美页岩的分布范围内, 并显示物源区主要受花岗岩及英云闪长岩影响。

3.1 元素组成

赣中变质岩带变泥砂质岩石的主元素组成变化较大。30 个样品的分析结果表明, SiO₂ 和 Al₂O₃ 分别为 54.86% ~ 76.07% 和 9.85% ~ 19.85%, TFe₂O₃ (= FeO + 0.9Fe₂O₃)、MgO 和 K₂O 分别为 4.06% ~ 10.45%、1.22% ~ 4.99% 和 0.64% ~ 4.60% (表 1)。含云母和石榴子石高的富泥质岩石, SiO₂、CaO 和 Na₂O 含量相对较低, Al₂O₃、TFe₂O₃、K₂O 和 MgO 含量相对较高。含石英和斜长石高的富砂质岩石则正好相反。岩石中 K₂O 主要以云母类矿物形式存在。

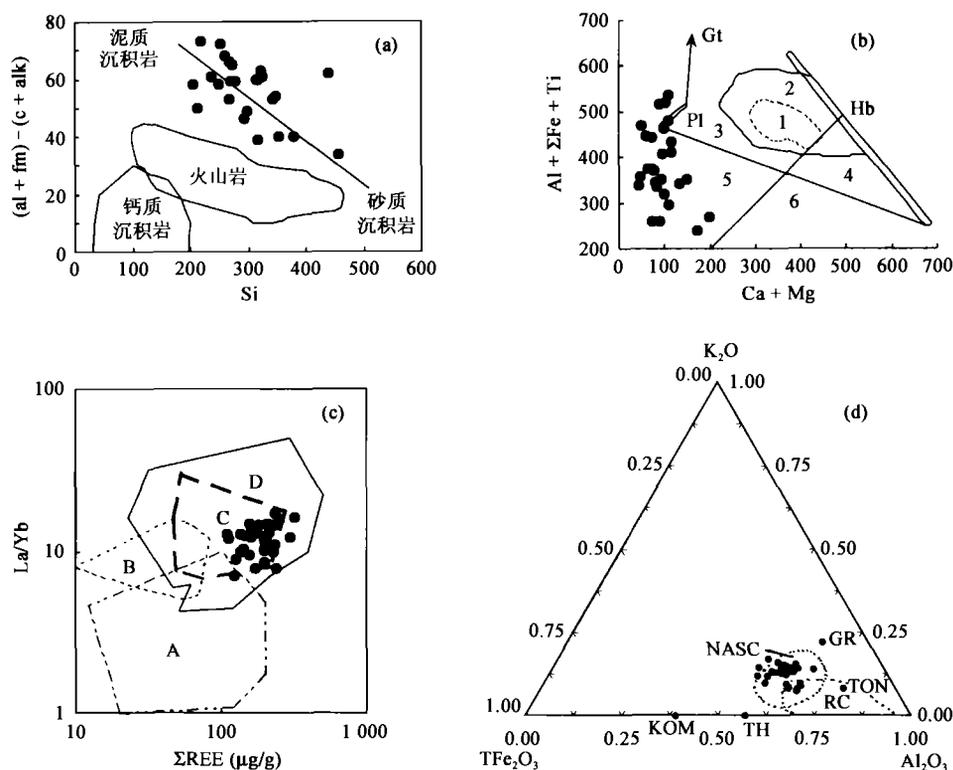


图2 赣中变质岩带变泥砂质岩石的尼格里值 $[(al + fm) - (c + alk)] - Si$ 图^[8](a)、 $(Al + \Sigma Fe + Ti) - (Ca + Mg)$ 图^[9](b)、 $La/Yb - \Sigma REE$ 图^[10](c) 和 $K_2O - TFe_2O_3 - Al_2O_3$ 图(d) (仿文献[11])

Fig. 2 Diagrams of $[(al + fm) - (c + alk)] - Si$ ^[8] (a), $(Al + \Sigma Fe + Ti) - (Ca + Mg)$ ^[9] (b), $La/Yb - \Sigma REE$ ^[10] (c)

and $K_2O - TFe_2O_3 - Al_2O_3$ ^[11] (d) of meta-argillo-arenaceous rocks of the metamorphic rock belt in central Jiangxi Province

图2b中: 1. 基性火成岩区; 2. 基性火成岩及其变种; 3. 中性火成岩、基性火山杂岩和含粘土的(沉)凝灰岩区; 4. 含碳酸盐的(沉)凝灰岩区; 5. 粘土、泥岩、粉砂岩、长石砂岩和泥灰质砂岩区; 6. 粘土质、白云质和钙质泥灰岩; Hb. 角闪石; Gt. 石榴子石; Pl. 斜长石。

图2c中: A. 正斜长角闪岩区; B. 碳酸盐岩区; C. 砂质岩和杂砂岩区; D. 页岩和粘土岩区。

图2d中: TON. 英云闪长岩; NASC. 北美页岩; GR. 花岗岩; TH. 拉斑玄武岩; KOM. 科马提岩; RC. 残余粘土。

样品 X566、G4 和 X47 的 SiO_2 含量最高, K_2O 和 Al_2O_3 含量最低, 岩石中石英含量也最高, 云母类矿物含量最低。X50 和 G4 的 CaO 和 Na_2O 含量相对较高, 这与一定数量的斜长石存在有关。显然, 主元素组成受造岩矿物种类和比例的制约。尽管主元素组成存在很大变化, 变泥砂质岩石稀土元素 (REE) 模式和某些微量元素的组成特征却十分类似 (表 2 和表 3, 图 3 和图 4)。岩石 REE 总量较高 ($\Sigma REE = 129 \sim 296 \mu g/g$), 出现较强的 Eu 负异常 ($\delta Eu = 0.51 \sim 0.86$) 及轻稀土元素 (LREE) 富集 (变粒岩 LREE 为球粒陨石的 54 ~ 90 倍, 片岩为球粒陨石的 63 ~ 121 倍)。所有样品重稀土元素 (HREE) 大致呈平坦型, 轻重稀土分离不强 [$(La/Yb)_N = 3.95 \sim 12.9$]。从变粒岩到片岩, REE 含量及 LREE 含量总体上趋于增高, 与 REE 赋存于粘土矿物的解释一致。在洋中脊玄武岩 (MORB) 标准化蛛网图 (图 4b) 上, 元素 Nb、Ti、P 和 Sc 出现负异常, 同时出现较强

的 Ba 负异常 ($\delta Ba = 0.10 \sim 0.93$)。在后太古宙澳大利亚页岩 (PAAS) 标准化蛛网图 (图 4a) 上, 除个别样品 (X566 和 G4) 外, 其余样品的分布模式类似于后太古宙页岩, 且较稳定, 为 PAAS^[14] 的 0.3 ~ 2.4 倍、北美页岩 (NASC) 的 0.3 ~ 2.3 倍。样品的 Zr/Y 比值主要介于 4 ~ 8 之间, 接近于元古宙页岩的分布范围 (2 ~ 7)^[16]。

3.2 Nd 同位素组成

赣中变质岩带变泥砂质岩石 Sm-Nd 同位素组成比较均匀 (表 4)。8 个样品的分析表明, $^{147}Sm / ^{144}Nd$ 和 $^{143}Nd / ^{144}Nd$ 分别为 0.104 61 ~ 0.152 39 和 0.511 827 ~ 0.512 132, f_{Sm-Nd} 为 -0.23 ~ -0.47, t_{CHUR} 和 t_{DM} 分别为 1 015 ~ 1 736 Ma 和 1 597 ~ 2 525 Ma, $\varepsilon_{Nd}(0) = -9.9 \sim -15.8$, $\varepsilon_{Nd}(1 113) = 1.11 \sim -3.60$, 样品间不存在良好的线性关系。赣中变质岩带变泥砂质岩石 Sm-Nd 同位素特征与闽

表 1 赣中变质岩带变泥砂质岩石的主元素组成 (%)

Table 1 Major element compositions (%) of meta-argillo-arenaceous rocks of the metamorphic rock belt in central Jiangxi Province

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
样号	Y5	Y61	Y65	Y8	X88	N1-3	Y60	X97	Y62	X14	X45	X50	X01	X37	X47
SiO ₂	68.08	67.45	68.92	69.23	68.78	71.36	60.12	60.50	54.86	62.02	68.89	69.44	63.87	59.25	75.30
TiO ₂	0.74	0.18	0.10	0.73	0.83	0.57	0.40	0.37	0.36	0.70	0.68	0.49	0.72	1.16	0.68
Al ₂ O ₃	14.35	15.35	12.28	14.25	13.76	12.69	18.10	14.40	17.48	16.75	14.09	13.99	17.97	19.09	10.54
Fe ₂ O ₃	0.91	2.50	1.70	2.05	3.98	0.50	2.16	3.71	3.49	3.26	1.90	0.55	2.33	1.83	1.52
FeO	5.13	3.00	4.70	3.02	2.06	5.16	5.54	4.99	7.31	5.94	4.45	4.50	3.96	7.71	4.55
MnO	0.11	0.09	0.07	0.15	0.15	0.15	0.09	0.13	0.36	0.17	0.06	0.19	0.08	0.13	0.10
MgO	2.41	2.30	2.40	2.23	1.59	2.32	3.10	2.90	4.20	3.71	2.51	1.87	2.06	3.68	1.76
CaO	0.83	1.30	0.80	1.19	0.30	1.37	0.80	1.10	2.50	0.44	0.77	2.62	0.40	0.56	0.66
Na ₂ O	1.30	3.22	0.97	1.42	3.13	1.30	1.10	1.00	1.92	0.62	1.29	2.96	1.16	0.77	1.47
K ₂ O	3.38	2.19	3.79	3.48	2.04	3.07	4.60	3.88	3.79	3.45	2.94	1.83	3.94	4.23	1.77
P ₂ O ₅	0.23	0.93	0.80	0.25	0.26	0.23	0.83	0.80	0.80	0.13	0.05	0.87	0.14	0.30	0.06
烧失	1.72	1.40	2.79	1.11	2.35	1.09	3.02	5.61	2.70	2.01	1.40	1.65	2.70	1.01	1.01
总量	99.19	99.91	99.32	99.11	99.23	99.81	99.86	99.39	99.77	99.20	99.91	99.39	99.33	99.72	99.42
CIA	66.40	60.54	63.38	63.27	63.53	61.67	68.73	64.74	59.70	75.05	67.68	54.73	72.54	73.25	65.42
CIW	79.92	66.68	80.13	75.94	70.68	73.53	84.76	79.66	69.30	90.04	80.00	59.31	87.36	89.05	74.19
序号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
样号	X52	X67	X566	X30	X61	Y9	X62	X11a	X11d	X51	G2	G3	G4	Zk320	Zk47
SiO ₂	67.58	70.04	76.07	57.94	63.76	57.25	64.89	64.87	63.09	62.02	69.01	61.67	75.11	61.66	54.87
TiO ₂	0.78	0.72	0.57	0.75	0.82	1.16	0.62	0.72	0.66	0.70	0.71	0.73	0.77	0.80	0.87
Al ₂ O ₃	15.21	13.52	9.85	16.43	17.13	19.09	17.01	17.87	18.01	16.75	13.55	17.89	10.85	17.70	19.85
Fe ₂ O ₃	4.38	0.93	1.57	1.93	1.14	1.83	1.19	2.31	1.01	3.26	1.73	2.05	1.67	3.69	3.98
FeO	1.85	4.25	2.66	5.65	5.66	7.71	6.01	3.98	3.83	5.94	4.59	5.55	2.56	3.04	6.23
MnO	0.03	0.13	0.14	0.20	0.12	0.13	0.11	0.08	0.16	0.17	0.06	0.08	0.15	0.12	0.10
MgO	1.70	1.92	1.22	2.92	2.40	3.68	2.35	2.06	4.99	3.71	1.98	2.61	1.32	2.61	3.50
CaO	0.14	1.83	2.34	2.53	0.12	0.56	0.17	0.40	0.45	0.44	1.78	1.73	2.44	1.73	1.18
Na ₂ O	0.21	3.97	2.66	1.18	1.51	0.77	1.50	1.26	0.92	0.62	0.89	1.15	2.56	1.15	1.32
K ₂ O	3.68	1.61	0.64	4.52	3.96	4.23	3.95	3.94	3.65	3.45	2.94	3.55	0.94	3.62	4.56
P ₂ O ₅	0.19	0.14	0.08	0.15	0.16	0.30	0.15	0.14	0.13	0.13	0.05	0.09	0.08	0.21	0.22
烧失	3.29	0.90	1.30	5.20	2.82	2.41	1.52	1.85	2.52	2.01	1.96	2.00	1.40	3.00	3.02
总量	99.04	99.96	99.10	99.40	99.60	99.12	99.47	99.48	99.42	99.20	99.25	99.10	99.85	99.33	99.70
CIA	76.76	53.61	51.36	58.94	71.16	73.08	70.63	71.69	74.15	75.11	62.83	71.78	53.01	66.59	68.08
CIW	95.94	57.62	53.17	71.52	86.35	88.91	85.65	86.25	88.41	90.14	73.82	84.74	55.91	77.99	82.17

注：1~6 为变质岩类；1、2、3 为黑云斜长变粒岩，4 为云母斜长变粒岩，5 为云母变粒岩，6 为含夕线黑云斜长变粒岩；7~30 为片岩类；7、9 为夕线云母片岩，8、10、11 为十字石榴云母石英片岩，12、16 为石榴云母石英片岩，13 为含榴云母片岩，14 为石榴二云片岩，15、17 为石榴黑云石英片岩，18、28 为含角闪云母石英片岩，19、20 为黑云片岩，21 为含榴夕线黑云片岩，22 为二云母片岩，23、25 为含榴二云片岩，24 为含榴、十字云母片岩，26 为石榴二云石英片岩，27 为二云石英片岩，29、30 为千枚状片岩。CIA = [Al₂O₃ / (Al₂O₃ + CaO + Na₂O + K₂O)] × 100, CIW = [Al₂O₃ / (Al₂O₃ + CaO + Na₂O)] × 100(摩尔比, CaO 仅代表硅酸盐组分中的 CaO)。

北麻源群变质沉积岩具有类似的 Sm-Nd 同位素特征 [¹⁴⁷Sm / ¹⁴⁴Nd = 0.1145 ~ 0.1167, ε_{Nd}(0) = -11.4 ~ -15.8, ε_{Nd}(t) = -1.15 ~ -1.25, t_{DM} = 1810 ~ 1835 Ma^[17]], 在 ε_{Nd}(t) - t 图解(图 5)上具有相近的演化范围和趋势, 反映出它们具有类似的物质来源和相同的物源区。而与赣东北、皖南等地区

前震旦系变质沉积岩的 Sm-Nd 同位素特征 [ε_{Nd}(0) = -8.27 ~ -9.44] 及模式年龄 (t_{DM} = 1522 ~ 1699 Ma)^[18] 明显不同, 在 ε_{Nd}(t) - t 演化图上位于它们的上方, 赣中及其闽北麻源群变质沉积岩的成岩碎屑不可能来自其北部的扬子地块, 应是其东缘的太古代岩石, 事实上在其东缘的龙泉、浙东沿海有太古代

表 2 赣中变质岩带变泥砂质

Table 2 Trace element contents ($\mu\text{g/g}$) of meta-argillo-arenaceous

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
样号	Y5	Y61	Y65	Y8	X88	N1-3	Y60	X97	Y62	X14	X45	X50	X01	X37	X47
Li	132	52.8	50.6	50.9	45.2	41.2	77.4	103	87.7	25.8	39.4	36.8	34.5	40.0	39.1
Sc	15.1	11.2	13.5	7.31	12.2	10.2	19.2	22.0	25.0	8.81	7.10	7.69	18.7	9.01	8.19
V	139	84.0	89.6	97.3	99.2	97.2	139	119	119	80.0	63.5	64.1	150	90.3	75.9
Cr	114	74.1	98.2	89.6	90.3	89.2	113	94.1	163	49.5	197	135	94.2	70.3	157
Co	37.9	15.2	17.0	28.5	38.6	40.6	23.6	26.7	23.1	8.74	13.8	11.4	18.5	28.8	14.1
Ni	62.2	36.4	38.6	31.9	45.5	47.5	64.7	49.6	65.2	20.1	31.2	22.0	39.4	34.4	72.1
Cu	99.0	23.9	25.9	41.8	55.7	74.9	36.6	66.8	138	45.6	20.1	35.7	11.1	13.9	52.8
Zn	133	97.6	102	77.0	101	114	132	189	169	69.1	73.3	103	153	105	82.7
Ga	23.2	15.4	16.8	14.6	16.5	17.5	24.4	24.3	22.2	17.0	10.3	19.4	28.2	17.8	14.7
Ge	2.26	1.50	1.79	1.28	1.89	2.15	1.79	2.89	3.51	1.61	1.64	2.58	2.49	2.06	2.01
As	2.13	-	55.8	1.82	1.56	2.67	-	-	-	1.81	10.9	3.00	1.78	3.39	4.20
Rb	172	81.4	145	73.1	169	174	166	183	178	69.5	85.6	123	193	114	88.4
Sr	209	210	103	211	98.9	64.9	109	71.7	272	129	144	163	82.6	49.8	35.4
Y	23.7	20.5	27.7	15.6	19.7	18.7	27.1	29.0	58.1	22.6	28.3	25.9	31.7	31.3	22.3
Zr	134	128	191	133	121	111	177	147	314	192	210	118	210	192	180
Nb	16.1	11.8	13.7	11.5	11.9	13.0	17.3	14.3	19.0	10.4	9.89	12.5	15.2	12.1	12.1
Mo	0.55	0.13	0.09	0.24	0.59	0.90	0.35	0.05	0.60	1.05	0.85	0.79	0.16	0.55	0.69
Cd	0.14	0.05	0.09	0.05	0.04	0.07	0.07	0.11	0.20	0.11	0.03	0.06	0.12	0.13	0.02
Sn	3.14	2.60	3.28	1.62	3.56	3.75	3.75	4.67	3.22	3.96	2.15	2.71	4.61	4.37	3.10
Sb	0.11	-	-	0.06	0.15	0.14	-	-	-	0.20	1.46	0.59	0.13	0.17	0.48
Cs	13.8	6.81	14.5	6.41	13.8	15.1	12.3	16.2	13.7	3.94	7.17	11.9	15.5	5.62	7.36
Ba	718	380	715	313	398	340	1122	288	598	826	304	196	556	334	281
Hf	4.26	4.19	6.14	4.25	4.06	3.47	5.71	4.90	10.3	6.57	6.58	4.18	7.36	6.67	6.02
Ta	1.20	0.76	0.90	0.81	0.75	0.90	1.13	1.08	1.55	0.94	0.80	1.18	1.27	1.06	0.95
W	241	0.20	1.64	208	1.59	306	1.91	1.23	0.77	2.19	1.24	2.07	4.16	211	1.41
Pb	54.3	19.9	27.2	23.4	20.6	18.1	24.8	29.0	43.0	70.0	15.4	62.2	44.9	27.7	14.5
Th	13.8	7.03	8.86	8.77	13.3	11.1	11.2	12.5	18.1	15.0	15.2	12.0	13.6	17.4	14.5
U	2.66	1.47	1.99	1.90	2.73	1.73	2.22	2.34	3.70	2.23	2.85	2.92	4.00	3.34	2.95
Th/U	5.19	4.78	4.45	4.62	4.87	6.42	5.05	5.34	4.89	6.73	5.33	4.11	3.40	5.21	4.92
La/Y	1.86	1.27	1.12	1.76	1.61	1.86	1.49	1.11	0.99	1.92	1.38	1.13	1.62	1.28	1.61
Th/Sc	0.91	0.63	0.66	1.20	1.09	1.09	0.58	0.57	0.72	1.70	2.14	1.56	0.73	1.93	1.77

注: 岩性同表 1。“-”表示低于检测限。

岩石存在的可能性,陈蔡群中的变粒岩、斜长片麻岩普遍具有老的模式年龄($t_{DM} = 2\ 350 \sim 2\ 832\ \text{Ma}$),低的 $\varepsilon_{Nd}(0)$ 值($-19.66 \sim -26.59$)^[19],在 $\varepsilon_{Nd}(t)-t$ 演化图上位于它们的下方(图 5)。

4 讨论

4.1 赣中变质岩带的形成时代

泥砂质岩石 Nd 同位素组成不但能很好地反映

源区物质的组成特征^[20-23],一定条件下,还能为时代确定起到重要作用。赣中变质岩带变泥砂质岩石 t_{DM} 模式年龄变化较大,为 $1\ 597 \sim 2\ 525\ \text{Ma}$,平均值为 $1\ 948\ \text{Ma}$ 。赣中变质岩带遭受变质变形叠加改造,但引起 REE 发生明显迁移的蚀变作用不强。所分析样品都较新鲜,排除了外生风化的强烈影响。同时,赣中变质岩带变玄武质岩石很少,其 ΣREE 很低,同时代地幔物质大量加入的可能性也可排除。赣中变质岩带变泥砂质岩石具有高的成熟度,是经历过搬运沉积和地球化学等壳内再循环作用的产物。根据

表3 赣中变质岩带变泥砂质岩石的稀土元素含量($\mu\text{g/g}$)Table 3 Contents ($\mu\text{g/g}$) of rare earth elements in meta-argilite-arenaceous rocks of the metamorphic rock belt in central Jiangxi Province

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
样号	Y5	Y61	Y65	Y8	X88	N1-3	Y60	X97	Y62	X14	X45	X50	X01	X37	X47
La	44.2	26.0	31.1	27.4	31.6	34.9	40.5	32.1	57.6	43.4	39.0	29.2	51.3	40.1	35.9
Ce	86.7	52.9	64.9	54.2	69.2	68.1	81.1	69.1	117	91.0	81.4	61.5	108	84.8	74.6
Pr	10.3	6.02	7.53	6.38	7.50	8.10	8.96	7.36	13.5	11.3	9.30	7.11	12.7	10.2	8.64
Nd	38.9	23.3	29.1	24.1	26.0	30.6	33.6	29.3	54.3	43.7	34.6	27.1	47.3	37.4	32.2
Sm	7.76	4.57	5.83	4.58	6.47	5.82	5.90	6.26	11.4	8.95	6.56	6.11	9.50	7.72	6.69
Eu	1.79	1.15	1.32	1.06	1.13	1.11	1.34	1.13	1.85	2.01	1.32	1.47	1.87	1.40	1.19
Gd	6.44	4.21	5.76	3.89	5.19	4.86	6.11	6.02	10.6	7.56	5.52	5.26	7.92	6.58	5.72
Tb	0.92	0.65	0.93	0.55	0.90	0.68	0.97	1.17	1.79	1.05	0.88	0.80	1.21	1.04	0.83
Dy	4.92	4.08	5.40	3.13	4.50	3.76	5.45	8.24	10.4	5.53	5.22	4.72	6.57	5.93	4.46
Ho	0.87	0.78	1.04	0.61	1.01	0.69	1.14	1.81	2.27	0.95	1.05	0.88	1.19	1.13	0.84
Er	2.43	2.22	2.70	1.68	3.05	2.11	2.91	5.35	6.20	2.43	2.95	2.54	3.40	3.39	2.40
Tm	0.36	0.32	0.41	0.26	0.37	0.33	0.47	0.80	0.97	0.35	0.48	0.41	0.48	0.51	0.33
Yb	2.32	2.14	2.58	1.81	2.23	2.31	2.74	5.50	6.76	2.35	3.08	2.81	3.32	3.53	2.28
Lu	0.34	0.31	0.35	0.27	0.32	0.36	0.39	0.77	0.94	0.37	0.46	0.41	0.50	0.54	0.34
Σ REE	208	129	159	130	159	164	192	175	296	221	192	150	255	204	176
LREE	190	114	140	118	142	149	171	145	256	200	172	133	230	182	159
HREE	18.6	14.7	19.2	12.2	17.6	15.1	20.2	29.7	39.9	20.6	19.6	17.8	24.6	22.7	17.2
L/H	10.2	7.75	7.29	9.65	8.08	9.84	8.49	4.90	6.40	9.73	8.77	7.43	9.38	8.02	9.26
La/Yb	19.0	12.2	12.1	15.2	14.2	15.1	14.8	5.84	8.52	18.5	12.7	10.4	15.4	11.3	15.8
δ Eu	0.75	0.79	0.69	0.75	0.58	0.62	0.68	0.55	0.51	0.73	0.66	0.78	0.64	0.59	0.58
δ Ce	0.93	0.96	0.97	0.93	1.03	0.92	0.96	1.02	0.96	0.95	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97
(La/Yb) _s	12.9	8.23	8.15	10.2	9.56	10.2	10.0	3.95	5.76	12.5	8.56	7.03	10.4	7.66	10.7
序号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
样号	X52	X67	X566	X30	X61	Y9	X62	X11a	X11d	X51	G2	G3	G4	Zk320	Zk47
La	39.2	30.2	27.2	35.5	34.9	45.1	32.0	36.1	41.0	40.4	51.4	42.6	38.7	45.9	43.1
Ce	74.9	62.5	53.5	76.6	70.1	92.2	65.3	75.8	85.0	83.3	106	90.2	80.8	96.5	93.7
Pr	8.21	7.31	7.16	7.43	8.37	9.61	7.73	8.86	9.85	9.51	12.5	10.3	10.1	11.0	10.8
Nd	30.7	28.2	27.4	34.1	32.7	33.0	30.2	32.8	35.9	35.3	46.7	39.4	36.8	41.2	41.3
Sm	6.05	5.44	5.71	6.94	6.86	7.81	6.29	6.31	7.06	7.83	9.31	7.42	7.80	8.51	9.20
Eu	1.24	1.48	1.25	1.41	1.35	1.45	1.38	1.21	1.37	2.06	1.62	1.37	1.48	2.02	1.80
Gd	4.84	4.91	5.30	6.29	5.98	6.14	5.86	5.67	5.98	7.06	7.58	6.40	7.16	7.92	7.80
Tb	0.64	0.74	0.89	1.03	1.13	1.06	0.97	0.84	0.89	1.10	1.06	0.98	1.29	1.22	1.30
Dy	3.54	4.51	5.62	4.90	6.04	4.86	5.68	4.95	5.58	6.58	5.70	5.44	6.40	7.32	8.00
Ho	0.68	0.95	1.09	1.01	0.95	1.17	1.09	0.93	1.11	1.36	1.04	1.04	1.36	1.44	1.70
Er	2.03	2.70	3.28	2.72	2.60	3.44	3.06	2.77	3.28	4.20	2.86	3.08	3.91	4.15	4.70
Tm	0.33	0.45	0.49	0.40	0.45	0.48	0.42	0.40	0.49	0.71	0.44	0.49	0.59	0.61	0.70
Yb	2.24	3.13	3.26	2.45	2.81	3.06	2.94	2.86	3.47	5.24	3.24	3.27	3.78	4.19	4.30
Lu	0.37	0.45	0.48	0.30	0.41	0.49	0.43	0.42	0.52	0.80	0.50	0.50	0.58	0.60	0.68
Σ REE	175	153	143	181	175	210	163	180	202	205	250	212	201	233	229
LREE	160	135	122	162	154	189	143	161	180	178	228	191	176	205	200
HREE	14.7	17.8	20.4	19.1	20.4	20.7	20.5	18.8	21.3	27.1	22.4	21.2	25.1	27.5	29.2
L/H	10.9	7.57	5.99	8.48	7.57	9.13	6.99	8.54	8.45	6.60	10.2	9.03	7.01	7.47	6.85
La/Yb	17.5	9.66	8.34	14.5	12.4	14.7	10.9	12.6	11.8	7.71	15.9	13.0	10.2	11.0	10.0
δ Eu	0.68	0.86	0.69	0.64	0.63	0.62	0.69	0.61	0.63	0.83	0.57	0.60	0.60	0.74	0.63
δ Ce	0.94	0.96	0.89	1.06	0.94	1.00	0.95	0.97	0.97	0.97	0.96	0.99	0.94	0.98	1.00
(La/Yb) _s	11.8	6.52	5.64	9.80	8.40	9.95	7.36	8.52	7.99	5.21	10.7	8.81	6.92	7.41	6.77

注: 岩性同表1。La/Yb为元素对比值, (La/Yb)_s为球粒陨石标准化后的比值, L/H为LREE/HREE。

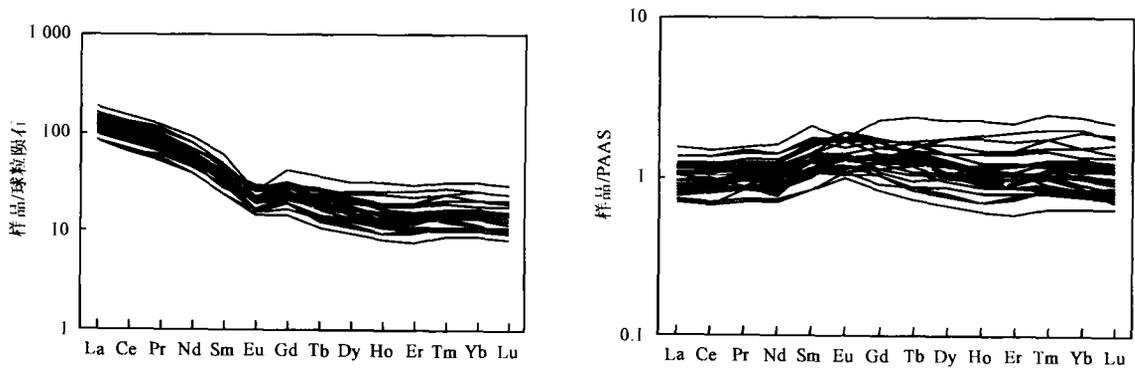


图 3 赣中变质岩带变泥砂质岩石的稀土元素分布模式

Fig. 3 REE distribution patterns of meta-argillo-arenaceous rocks of the metamorphic rock belt in central Jiangxi Province with Leedy (1984)球粒陨石成分和后太古宙澳大利亚页岩(PAAS)¹⁴¹标准化

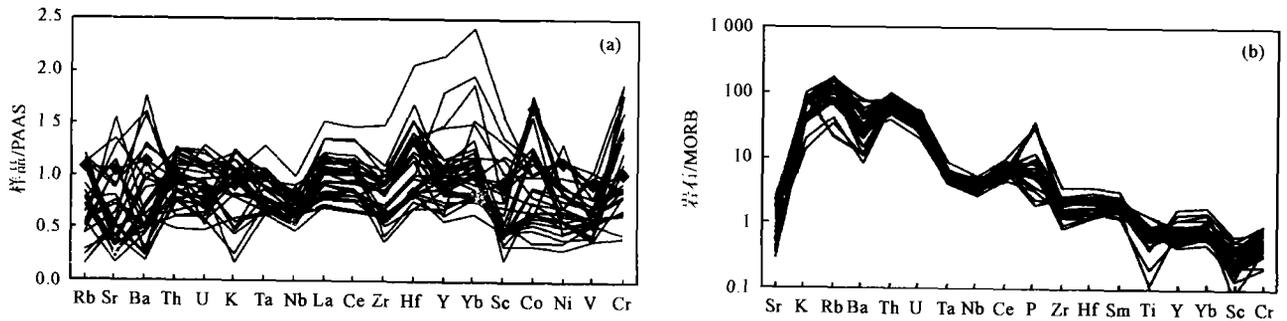


图 4 PAAS¹⁴¹(a)和 MORB¹⁵¹(b)标准化的赣中变质岩带变泥砂质岩石元素蛛网图解

Fig. 4 PAAS¹⁴¹- (a) and MORB¹⁵¹-normalized (b) spidergrams of meta-argillo-arenaceous rocks of the metamorphic rock belt in central Jiangxi Province

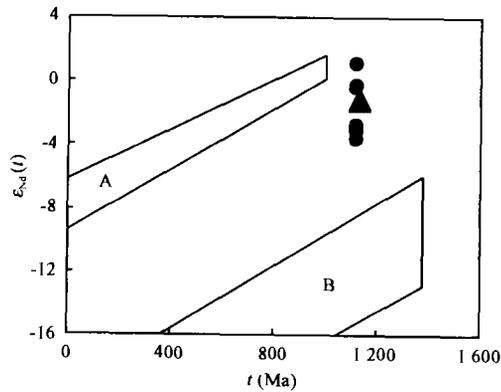


图 5 赣中变质岩带变泥砂质岩石及其邻区变质沉积岩的 $\epsilon_{Nd}(t) - t$ 演化图

Fig. 5 $\epsilon_{Nd}(t) - t$ evolutionary diagram of meta-argillo-arenaceous rocks of the metamorphic rock belt in central Jiangxi Province and its neighboring areas

黑圆点为赣中变泥砂质岩石样品；黑三角为闽北麻源群变质沉积岩样品；A 区域为赣东北和皖南前震旦系样品的变化范围(据文献[18])；B 区域为龙泉和浙东沿海陈蔡群样品的变化范围(据文献[19])

表 4 赣中变质岩带变泥砂质岩石的 Sm-Nd 同位素组成及计算参数

Table 4 Sm-Nd isotopic compositions and calculated parameters of meta-argillo-arenaceous rocks of the metamorphic rock belt in central Jiangxi Province

样号	Sm ($\mu\text{g/g}$)	Nd ($\mu\text{g/g}$)	¹²⁵ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2 σ	$f_{\text{Sm-Nd}}$	t_{MORB} (Ma)	t_{DMR} (Ma)	$\epsilon_{\text{Nd}}(1113)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	Th/Sc
X45G1	3.890	14.41	0.15239	0.512132	14	-0.23	1736	2525	-	-9.90	-
X45	7.135	35.67	0.12100	0.511901	25	-0.39	1481	2050	-3.60	-14.4	2.134
X50	3.352	17.28	0.11731	0.512045	16	-0.40	1138	1746	-0.25	-11.6	1.564
X47	5.265	24.03	0.13252	0.512017	28	-0.33	1472	2124	-2.98	-12.1	1.773
G4	7.890	42.58	0.10461	0.511827	18	-0.47	1341	1846	-2.70	-15.8	3.599
X67	5.350	27.74	0.10871	0.512052	22	-0.45	1015	1597	1.11	-11.4	1.212
Y8	19.64	94.95	0.11670	0.512038	16	-0.41	1142	1746	-0.30	-11.7	1.200
Y5	4.590	24.32	0.11417	0.511876	14	-0.42	1405	1948	-3.11	-14.9	0.913

注：模式年龄计算 $t_{\text{DMR}} = (1/\lambda) \ln \{ [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}) - 0.51315] / [(^{125}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}) - 0.2136] + 1 \}$ 。“-”表示未测试。

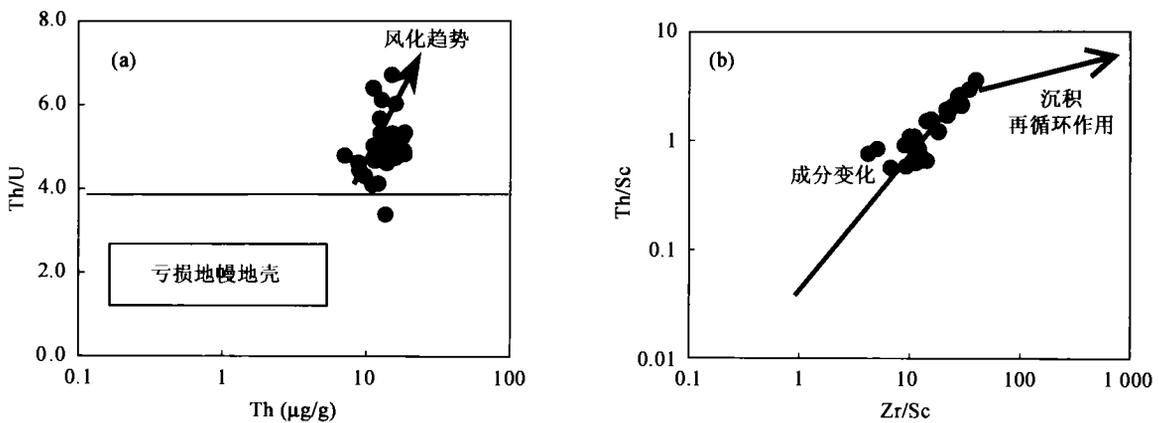


图6 赣中变质岩带变泥砂质岩石的 Th/U-Th (a) 和 Th/Sc-Zr/Sc (b) 图解(仿文献[26])

Fig. 6 Plots^[26] of Th/U-Th (a) and Th/Sc-Zr/Sc (b) for meta-argillo-arenaceous rocks of the metamorphic rock belt in central Jiangxi Province

直接来源于火成岩沉积物的分布趋势一致, 源区岩石为直接来源于经历了一定风化作用的火成岩石。

沉积岩中风化物的相对含量可以用 CIA 参数和 CIW 参数来表示, 用以判断页岩物源区的古风化强度及古气候状态^[11]。CIW 参数避免了成岩作用或变质作用期间 K 活动的问题。在 CIW-Sr 图解上, 30 个变泥砂质岩石样品中有 25 个样品的 CIW 在 69.30 ~ 95.94 之间, 其中有 17 个样品大于 79.00, 仅有 5 个样品在 53.17 ~ 66.68 之间, Sr 含量范围主要为 50 ~ 250 µg/g, 非常接近于大多数后太古宙页岩的分布范围 (Sr 75 ~ 200 µg/g, CIW 80 ~ 95)^[11]。有 24 个样品的 CIA 值 (60.5 ~ 76.8) 已接近于页岩平均值 (70 ~ 75), 没有一个样品的 CIA 值低于 50, 表明在化学成分上较成熟, 经历了较强的化学风化作用。

Al-Ti-Zr 三角图可用来判断沉积物分选作用过程的影响因素^[28], 成熟的沉积物主要由 TiO₂/Zr 比值变化范围很大的砂岩和页岩组成, 而不成熟的沉积物正好相反, 本区岩石在 15Al₂O₃-TiO₂-Zr 图 (图

略) 上表现为 TiO₂/Zr 比值变化范围较大, 指示源区岩石分选作用较强和经历了较缓慢的沉积过程。

4.3 源区成分特征

一般认为, REE、高场强元素 (HFSE)、Th、Sc、Hf 和 Co 能够较好地反映物源区特点^[23], 在 PAAS 标准化蛛网图 (图 4a) 上, 样品总体上近于平坦分布: Hf、La、Ce、Yb、Y 和 Cr 接近; Ta、V、Co 和 Ni 相近到稍低; Rb、Sr、Ba、K、Th、U、Nb、Zr 和 Sc 明显亏损。Sr 含量较低与强烈化学风化作用相联系, 不相容元素含量较高, 表明源区较分异, 源区应以花岗质岩类为主而缺乏超镁铁质组分, 类似于现今上地壳, 这一点从岩石的 La/Th-Hf 元素对比值图 (图 7a) 和 ε_{Nd}(0)-Th/Sc 元素对比值图 (图 7b) 上也可以得到佐证。

岩石的 Zr、Ti、Hf (Sc、Y) 及 HREE 明显亏损, 对应于花岗岩物源区特征^[11]。在 Cr/Ti-Zr/Y 图解 (图略) 上, 大部分样品 (26 个) 的 Cr/Ti 比值在

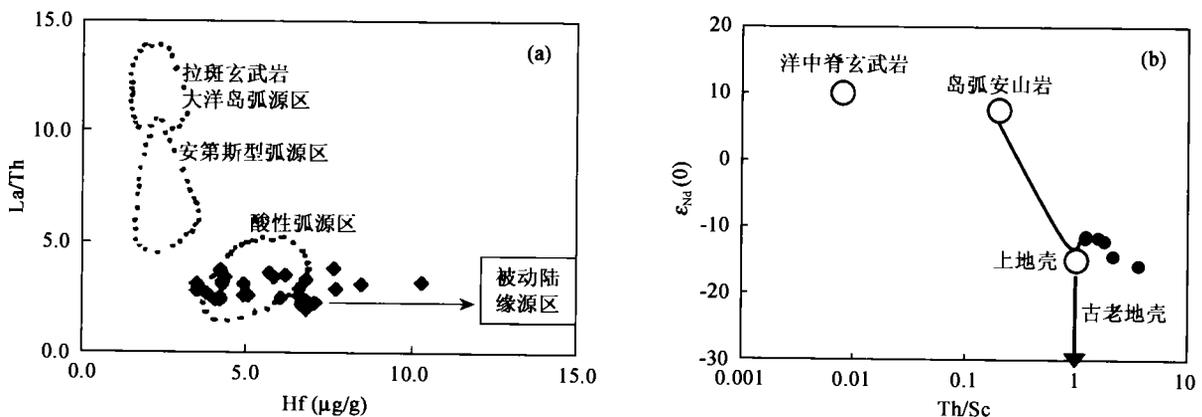


图7 变泥砂质岩石的 La/Th-Hf (a) (仿文献[25]) 和 ε_{Nd}(0)-Th/Sc (b) (仿文献[29]) 图解

Fig. 7 Plots of La/Th-Hf^[25] (a) and ε_{Nd}(0)-Th/Sc^[29] (b) for meta-argillo-arenaceous rocks in central Jiangxi Province

0.01 ~ 0.045 之间, 明显高于南非 Witwatersrand 超群及 Pongolar 超群, 略高于太古宙花岗岩或 TTG(英云闪长奥长花岗岩)的平均值(约 0.012), 低于太古宙玄武岩的平均值(约 0.07), 指示沉积物主要来自花岗质物源区。

泥质岩的 Cr/Th 比值主要受局部源区及构造强烈影响, 是源区敏感的指示参数, 可以记录上地壳成分的变化特征^[30]。本区岩石的 Cr/Th 比值(3.31 ~ 14.25), 明显低于太古宙上地壳的平均比值(31), Cr/Th 比值低, 反映源区科马提岩-玄武岩组含量低, 而以花岗岩成分为主。Th 是高度不相容的, 而 Sc 较相容, 在沉积过程中两者定量地进入陆缘沉积中^[30], Th/Sc 比值对于沉积源区平均成分较敏感, 可以反映源区花岗岩/(玄武岩+科马提岩)的相对比例。本区岩石的 Th/Sc 比值主要介于 1.00 ~ 3.60 之间, 明显高于太古宙绿岩带杂砂岩类(小于 1)和 McLennan *et al.*^[22]划定的太古宙沉积分布范围(小于 1), 也高于典型的太古宙克拉通沉积(例如 Witwatersrand 超群及 Pongolar 超群), 应为稳定地壳构造环境的产物。在 La-Th-Sc 图解^[31]上, 投影点大致平行于花岗岩-拉斑玄武岩端元的分布线, 集中于花岗岩附近, 也指示沉积原岩主要来源于花岗岩组分。

沉积岩中 Cr 和 Ni 的含量指示源区镁铁质-超镁铁质组分的贡献大小, 与太古宙沉积岩相比, 本区岩石的 Ni 和 Cr 含量较低, 分别为 Cr 45.7 ~ 209 $\mu\text{g/g}$, Ni 16.8 ~ 72.1 $\mu\text{g/g}$; 在 Ni-Cr 图解上, 样品主要落在后太古宙与新太古代页岩的重叠区内, 其 Cr 和 Ni 含量稍低于南非林波带的太古宙 Beit Bridge 群(变质的大陆架浅海沉积)、南非卡普瓦拉克拉通的太古宙 Witwatersrand 超群、Pongolar 超群(典型的克拉通沉积)。Cr 和 Ni 含量低表明源区的镁铁质组分较低。Cr-Zr 图解可以指示沉积源区锆石/铬铁矿的相对含量(即科马提岩/花岗岩区组分的相对比例), 样品的 Cr/Zr 比值介于 0.26 ~ 1.14 之间(个别为 2.35 ~ 2.38), 远远低于南非卡普瓦拉克拉通太古宙 Witwatersrand 超群页岩和 Pongolar 超群泥质岩^[31], 表明物源区的超镁铁质岩石组分并不重要, 沉积物主要来源于中酸性源区。

岩石的 REE 分布模式表明, 源区曾经历壳内熔融或涉及岩浆内斜长石的结晶分异过程^[23], 广泛出现了 Eu 亏损的花岗质源区, 类似于现今的大陆上地壳成分。斜长石在壳内熔融过程中多有残留, 而 Eu 强烈地被分馏于斜长石内, 出现显著的 Eu 负异

常($\delta\text{Eu} < 0.85$), 反映古老地壳物质或被分异花岗质岩石的再循环作用。岩石的 δEu 值接近于克拉通页岩的比值(0.6 ~ 0.7)^[30]。在 $\delta\text{Eu}-(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 图解(图略)上, 岩石以中等的 Eu 负异常为特征, 投影在“后太古宙”沉积岩系范围。样品的 REE 分布模式与 PAAS 相比, LREE 较富集, HREE 部分呈平坦型, 轻重稀土分离不强[(La/Yb)_N = 3.95 ~ 12.9], 在 MORB 标准化的蛛网图上, 元素 Nb、Ti、P、Sc 相对亏损, 出现较强的 Ba 负异常($\delta\text{Ba} = 0.10 \sim 0.93$)。其总体特征与太古宙晚期富钾富铝的花岗质岩石十分类似, 与 TTG 花岗质岩石^[31]有很大区别。成熟度高的富铝富钾花岗质岩石构成了源区物质的重要组成。

4.4 原岩沉积构造环境

赣中变质岩带变泥砂质岩石的 $\Sigma \text{REE} = 129 \sim 296 \mu\text{g/g}$, $\delta\text{Eu} = 0.51 \sim 0.86$, (La/Yb)_N = 3.95 ~ 12.9, Th/Sc (0.57 ~ 3.59)、La/Sc (1.46 ~ 12.4)、La/Yb (5.84 ~ 19.0) 和 Th/U (3.40 ~ 6.42) 比值高, La/Th (2.00 ~ 3.78) 比值低, 与 Bhatia *et al.*^[32]所提出的不同构造环境背景 REE、微量元素参数相比较, 具有大陆边缘沉积物特点。在微量元素 Th-Sc-La 图上投影点主要落在活动大陆边缘和被动大陆边缘的重叠区及其附近; 在 La/Y-Sc/Cr 图上投影点主要落在被动大陆边缘区域内及其附近(图 8)。按照 Pettijohn^[33]提出的 $\lg(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})-\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ 图解(图略)进行分类, 原岩主要为长石砂岩, 少量岩屑砂岩及杂砂岩, 反映了原岩是在活动性较弱的构造背景下缓慢沉积的。岩石的 REE 分布模式、LREE、(La/Sm)_N、 δEu 及 (La/Yb)_N 值与 PAAS 较为一致, 反映原岩沉积于被动大陆边缘的构造环境^[34]。岩石 Nd 同位素组成比较均匀, 指示它们来自同一源区, 搬运沉积作用过程中不同组成物质发生充分混合。Nd 同位素组成 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 与 Th/Sc 比值对应关系(图 7b) 指示原岩是在被动大陆拖拽边缘的构造环境下形成的。赣中变质岩带变玄武质岩石虽具亏损性质, 不过出露很少, 表明地幔添加作用十分微弱。沉积物质主要来自早期陆壳基底, 并形成于被动大陆边缘的构造环境。显然, 在太古宙晚期阶段, 华夏地块首次克拉通化已经完成。

5 地质意义

地球化学证据表明, 赣中变质岩带变质岩系代表一套克拉通型的沉积岩系, 这套表壳岩系显示明

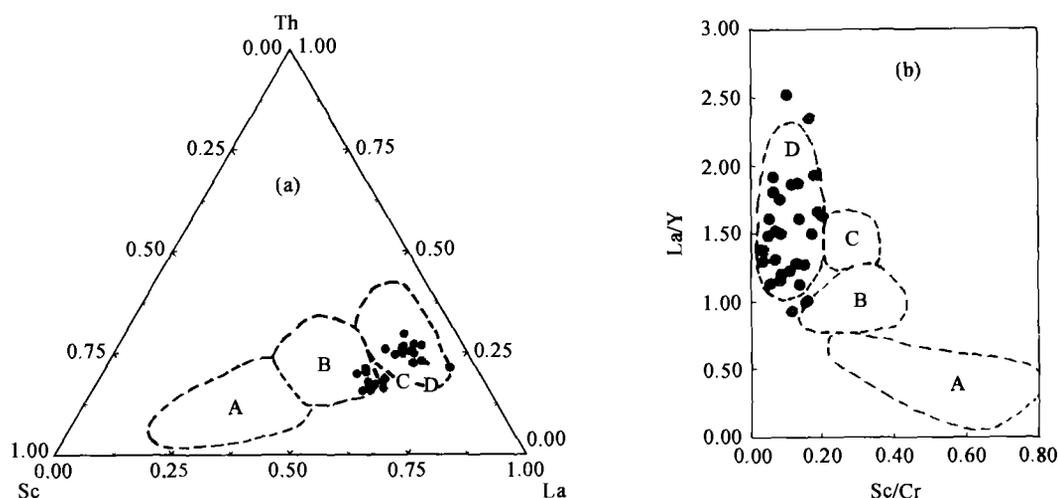


图8 变泥砂质岩石的 Th-Sc-La 和 La/Y-Sc/Cr 图(仿文献[32])

Fig. 8 Plots^[32] of Th-Sc-La (a) and La/Y-Sc/Cr (b) for meta-argillo-arenaceous rocks in central Jiangxi Province

A. 大洋岛弧; B. 大陆岛弧; C. 活动大陆边缘; D. 被动大陆边缘.

显的 LREE 富集及 Eu 负异常 ($\sum \text{REE} = 129 \sim 296 \mu\text{g/g}$, $\delta\text{Eu} = 0.51 \sim 0.86$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 3.95 \sim 12.9$), 其不相容元素 Th/Sc (0.57 ~ 3.59)、La/Sc (1.46 ~ 12.4)、La/Yb (5.84 ~ 19.0) 比值高, 大离子亲石元素富集, Th/U 比值 (3.40 ~ 6.42) 变化大, Zr、Hf、Sc、Ti、Y、HREE 和 Sr 含量较低; 在区域上, 与闽北麻源群的岩性组合、变质程度^[35]、Sm-Nd 同位素特征类似, 在 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) - t$ 图上具有相近的演化范围和趋势, 反映出它们具有类似的物质来源和相同的物源区, 沉积于远离陆地的克拉通大陆架浅海环境, 其原岩应为一套浅海相泥砂质复理石建造; $\delta\text{Ba} = 0.10 \sim 0.93$, Nd 同位素亏损地幔模式年龄 $t_{\text{DM}} = 1597 \sim 2525 \text{ Ma}$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(0) = -9.90 \sim -15.8$, 其源区物质主体由古元古代富铝富钾的花岗质岩石和(或)碎屑沉积岩构成。华夏地块东部在新太古代 - 古元古代已经历壳内分异过程, 源区经历了较强的化学风化作用, 是元古宙华夏地块克拉通化最重要的外生标志。

参考文献(References):

- [1] 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, 1997, 16(2): 222 ~ 224.
Hu Gong-ren, Zhang Bang-tong, Wang Chang-hua. First determination of the Neoproterozoic metamorphic rocks in Xiangshan, central Jiangxi Province [J]. Regional Geology of China, 1997, 16(2): 222 ~ 224 (in Chinese with English abstract).
- [2] 胡恭任, 章邦桐, 于瑞莲. 赣中变质岩带的 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素年代研究[J]. 地质论评, 1999, 45(2): 129 ~ 134.
Hu Gong-ren, Zhang Bang-tong, Yu Rui-lian. A study on Sm-Nd

and Rb-Sr isochron ages of the central Jiangxi metamorphic belt [J]. Geol. Rev., 1999, 45(2): 129 ~ 134 (in Chinese with English abstract).

- [3] Hu Gong-ren, Zhang Bang-tong, Yu Rui-lian. Petrology, chronology and isotope geochemistry of the Proterozoic amphibolites from Xiangshan, central Jiangxi Province, China [J]. Chinese J. Geochem., 1999, 18(2): 139 ~ 149.
- [4] 胡恭任, 章邦桐, 王湘云. 赣中相山元古宙斜长角闪岩的矿物学、岩石学特征及同位素地球化学研究[J]. 地球化学, 1998, 27(3): 217 ~ 229.
Hu Gong-ren, Zhang Bang-tong, Wang Xiang-yun. Mineralogy, petrology and isotopic geochemistry of the Proterozoic amphibolites from Xiangshan, central Jiangxi Province [J]. Geochimica, 1998, 27(3): 217 ~ 229 (in Chinese with English abstract).
- [5] 李杰元. 岩石矿物 Sm-Nd 等时线年龄测定[J]. 核工业北京地质研究院年报, 1992 ~ 1993, 10: 35 ~ 37.
Li Jie-yuan. The Sm-Nd isochron ages measuring of rocks and mineral [J]. Bull. Nucl. Ind. Beijing Geol. Acad., 1992 ~ 1993, 10: 35 ~ 37 (in Chinese with English abstract).
- [6] 胡恭任, 章邦桐. 赣中变质基底的 Nd 同位素组成和物质来源[J]. 岩石矿物学杂志, 1998, 17(1): 35 ~ 40.
Hu Gong-ren, Zhang Bang-tong. Neodymium isotope composition and source materials of the meta-basement in central Jiangxi Province [J]. Acta Petrol. Mineral., 1998, 17(1): 35 ~ 40 (in Chinese with English abstract).
- [7] 贺高品. 变质岩原岩成因的研究方法 [J]. 长春地质学院学报, 1986, 16(3): 111 ~ 120.
He Gao-pin. A method on the studying origin of the metamorphic rocks [J]. J. Changchun College Geol., 1986, 16(3): 111 ~ 120 (in Chinese with English abstract).
- [8] 温克勒 H G F. 变质岩成因 [M]. 张旗, 周云生译. 北京: 科学出版社, 1976. 100 ~ 105.
Winkler H G F. Petrogenesis of Metamorphic Rocks (2nd ed)

- [M]. New York: Springer-Verlag, 1967. 237p.
- [9] Condie K C, Boryta M D, Liu Jinzhong, *et al.* The origin of khondalites: Geochemical evidence from the Archean to Early Proterozoic granulite belt in the North China craton [J]. *Precamb Res*, 1992, 59(3/4): 207~223.
- [10] Gromet L P, Dymek R F, Haskin L A, *et al.* The "North American Shale Composite": Its compilation major and trace element characteristics [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1984, 48(12): 2469~2482.
- [11] Reimer T O, Condie K C, Schneider G, *et al.* Petrography and geochemistry of granitoid and metamorphic pebbles from the Early Archean Moodies Group, Barberton Mountainland/South Africa [J]. *Precamb Res*, 1985, 29(4): 383~404.
- [12] 王仁民, 贺高品, 陈珍珍, 等. 变质岩原岩图解判别法[M]. 北京: 地质出版社, 1987. 41~45.
Wang Ren-min, He Gao-pin, Chen Zhen-zhen, *et al.* The Distinguishing Diagrams for Protolith of Metamorphic Rocks [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987. 41~45 (in Chinese).
- [13] 赵振华. 稀土元素地球化学特征及其在岩石和矿床成因研究中的应用[J]. *地质地球化学*, 1978, 6(9): 1~11.
Zhao Zhen-hua. Rare earth element geochemical characteristics and their application in genesis study of rocks and deposits [J]. *Geology-Geochemistry*, 1978, 6(9): 1~11 (in Chinese with English abstract).
- [14] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution [M]. Oxford: Blackwell, 1985. 9~56.
- [15] Pearce J A. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins [A]. Hawkesworth C J, Norry M J. *Continental Basalts and Mantle Xenoliths* [C]. Nantwich: Shiva Publishing, 1983. 158~185.
- [16] Condie K C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: Contrasting results from surface samples and shales [J]. *Chem Geol*, 1993, 104(1/4): 1~37.
- [17] 陈迪云. 北武夷火山岩型铀(银、钼)矿床的物质来源及成因研究[D]. 南京: 南京大学, 1994.
Chen Di-yun. The source of ore-forming materials and genesis study of volcanic U (Ag, Mo) deposits in North Wuyi Mountains [D]. Nanjing: Nanjing University, 1994 (in Chinese with English abstract).
- [18] 陈江峰, 周泰禧, 邢凤鸣, 等. 皖南浅变质岩和沉积岩的钆同位素组成及沉积物物源区[J]. *科学通报*, 1989, (20): 1572~1574.
Chen Jiang-feng, Zhou Tai-xi, Xing Feng-ming, *et al.* The sediment source and Nd isotopic composition of low-grade metamorphic rocks and sediments from South Anhui [J]. *Chinese Sci Bull*, 1989, (20): 1572~1574 (in Chinese).
- [19] 徐步台. 浙东沿海火山岩区变质岩的同位素、稀土元素地球化学和地质年代学研究[J]. *浙江地质*, 1989, 5(2): 52~58.
Xu Bu-tai. A study on isotope, rare earth element geochemistry and geological chronology of metamorphic rocks from volcanic region in East of Zhejiang [J]. *Zhejiang Geol*, 1989, 5(2): 52~58 (in Chinese with English abstract).
- [20] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715~717.
- [21] Camiré G E, Laffèche M R, Ludden J N. Archean metasedimentary rocks from the northwestern Pontiac Subprovince of the Canadian Shield: Chemical characterization, weathering and modelling of the source areas [J]. *Precamb Res*, 1993, 62(3): 285~305.
- [22] McLennan S M, Taylor S R. Sedimentary rocks and crustal evolution: Tectonic setting and secular trends [J]. *J Geol*, 1991, 99(1): 1~21.
- [23] Condie K C, Wronkiewicz D J. The Cr/Th ratio in Precambrian pelites from the Kaapvaal Craton as an index of craton evolution [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1990, 97(3/4): 256~267.
- [24] Wronkiewicz D J, Condie K C. Geochemistry and provenance of sediments from the Pongola Supergroup, South Africa: Evidence for a 3.0-Ga-old continental craton [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1989, 53(7): 1537~1549.
- [25] Fedo C M, Eriksson K A, Krogstad E J. Geochemistry of shales from the Archean (~3.0 Ga) Buhwa greenstone belt, Zimbabwe: Implications for provenance and source-area weathering [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1996, 60(10): 1751~1763.
- [26] Crichton J G, Condie K C. Trace elements as source indicators in cratonic sediments: A case study from the Early Proterozoic Libby Creek Group, southeastern Wyoming [J]. *J Geol*, 1993, 101(3): 319~332.
- [27] McLennan S M, Taylor S R, McCulloch M T, *et al.* Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: Crustal evolution and plate tectonic association [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1990, 54(7): 2015~2050.
- [28] Martin H. Archean grey gneisses and continental crustorign [A]. Condie K C. *Archean Crustal Evolution* [C]. Amsterdam: Elsevier, 1994. 205~259.
- [29] 伍家善, 耿元生, 沈其韩, 等. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化[M]. 北京: 地质出版社, 1998. 1~212.
Wu Jia-shan, Geng Yuan-sheng, Shen Qi-han, *et al.* *Archean Geology Characteristics and Tectonic Evolution of Sino-Korea Paleo-Continent* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998. 1~212 (in Chinese).
- [30] Nelson B K, DePaolo D J. Comparison of isotope and petrographic provenance indicators from Tertiary continental basins of New Mexico [J]. *J Sediment Petrol*, 1988, 58: 348~357.
- [31] Chen C H, Jhan B M, Lee T, *et al.* Sm-Nd isotopic geochemistry of sediments from Taiwan and implications for the tectonic evolution of southeast China [J]. *Chem Geol*, 1990, 88(3/4): 317~332.
- [32] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1986, 92: 181~193.
- [33] Pettijohn E J. *Sedimentary Rocks* (3rd ed) [M]. New York: Harper and Row, 1975. 628p.
- [34] McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes [J]. *Rev*

Mineral, 1989, 21: 69 ~ 200.

- [35] 邓家瑞, 张志平. 闽、浙、赣晚前武纪构造格局探讨[J]. 地质论评, 1998, 44(6): 561 ~ 567.

Deng Jia-rui, Zhang Zhi-ping. Late Precambrian tectonic framework in Fujian, Zhejiang and Jiangxi [J]. Geol Rev, 1998, 44(6): 561 ~ 567 (in Chinese with English abstract).

Geochemical characteristics of meta-argillo-arenaceous rocks from the metamorphic rock belt in central Jiangxi Province and its geological significance

HU Gong-ren^{1,2,3}, LIU Cong-Qiang¹, ZHANG Bang-tong³, TANG Hong-feng¹

(1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362011, China; 3. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: The metamorphic rock belt in central Jiangxi Province, located in the compound terrain among the Huaxia terrain, the Yangtze terrain and the Caledonian fold zone of South China, is composed dominantly of meta-argillo-arenaceous rocks and small amounts of amphibolites. They underwent amphibolite-facies metamorphism. The meta-argillo-arenaceous rocks show large variations in major element compositions, but have similar REE patterns and trace element compositions, incompatible element and large-ion-lithophile element enrichments [high Th/Sc (0.57 ~ 3.59), La/Sc (1.46 ~ 12.4) and La/Yb (5.84 ~ 19.0)] and variable Th/U ratios, with $\sum \text{REE} = 129 \sim 296 \mu\text{g/g}$, $\delta\text{Eu} = 0.51 \sim 0.86$, $(\text{La}/\text{Yb})_n = 3.95 \sim 12.9$. The rocks have a large variation range of Nd isotopic mode age t_{DM} from 1 597 to 2 525 Ma and low $\varepsilon_{\text{Nd}}(0)$ from -9.9 to -15.8. The metamorphic rocks belt in central Jiangxi Province was likely formed in a tectonic environment of the passive continental margin of the Huaxia massif. The source region, from which the argillo-arenaceous rocks were derived, was composed dominantly of upper crustal sources (Al- and K-rich granitic or/and sedimentary rocks of Early Proterozoic) and experienced good sorting, slow deposition and more intense chemical weathering. According to the whole-rock Sm-Nd isochron ages [(1 113 ± 49) ~ (1 199 ± 26) Ma] of plagioclase-amphibole (schist) and Nd isotopic mode age t_{DM} (1 597 ~ 2 525 Ma) of meta-argillo-arenaceous rocks, the metamorphic rocks belt was formed in Midproterozoic between 1 100 ~ 1 600 Ma.

Key words: meta-argillo-arenaceous rocks; geochemistry; Nd isotope; metamorphic rock belt; Jiangxi Province

CLC number: P594

Document code: A