

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.297>



赣南某离子吸附型稀土矿床浅变质岩的矿化特征

赵芝¹, 陈郑辉¹, 邹新勇^{2*}, 王登红¹, 陈振宇¹

1. 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

2. 江西地勘局赣南地质调查大队, 江西赣州 341000

摘要: 近几年在赣南新元古代浅变质岩风化壳中发现了离子吸附型稀土矿床, 对矿区及南岭科学深钻中的浅变质岩样品进行了岩石、矿物及地球化学特征研究。矿区主要出露神山组和库里组(南华系), 前者以千枚岩为主, 含少量片岩, 后者以厚层变质沉淀灰岩和中厚层变质砂岩为主; 南岭科学深钻 1165~1170.77 m 库里组(青白口系)以变质沉淀灰岩为主夹薄层凝灰质板岩。浅变质岩类中新生变质矿物有绢云母、绿泥石、磁铁矿、堇青石、白云母、黑云母等, 稀土矿物有新奇钙铈矿、独居石、磷钇矿、水独居石等; 稀土含量为 162×10^{-6} ~ 723×10^{-6} , 富集轻稀土。新奇钙铈矿是矿体中离子相稀土的主要来源; 赣南青白口纪—南华纪中厚层变质沉淀灰岩和变质沉淀灰岩风化壳具有较好的稀土成矿前景。

关键词: 浅变质岩; 稀土元素; 离子吸附型稀土矿床; 赣南; 矿床学。

中图分类号: P614

文章编号: 1000-2383(2018)10-3652-12

收稿日期: 2017-05-09

REE Mineralization of Epimetamorphic Rocks from an Ion-Adsorption Type REE Deposit in Southern Jiangxi Province

Zhao Zhi¹, Chen Zhenghui¹, Zou Xinyong^{2*}, Wang Denghong¹, Chen Zhenyu¹

1. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Geological Survey Team of Gannan, Bureau of Geology and Mineral Exploration & Development of Jiangxi Province, Ganzhou 341000, China

Abstract: An ion-adsorption type REE deposit occurs in regolith of epimetamorphic rocks formed in Neo-Proterozoic, and has been discovered in South Jiangxi Province in recent years. Petrological and geochemical characteristics of the rocks from the REE deposit and Nanling scientific drilling were studied in this paper. Shenshan Formation and Kuli Formation are widely exposed in the deposit, and the former consists mainly of phyllite and minor schist whereas the latter consists of thick-layer metatuffite, metamorphic tuff, and medium-thick-layer metasandstone. Kuli Formation is composed of metamorphic tuff with thin layer tuffaceous slate that intersected by Nanling scientific drilling from 1165 m to 1170.77 m. The epimetamorphic rocks with neo formation of sericite, chlorite, magnetite, cordierite, muscovite, biotite, etc. contain REE minerals such as synchysite-(Ce), monazite, xenotime and rhabdophane-(La) etc. They are enriched in REEs (162×10^{-6} to 723×10^{-6}) with high LREE/HREE ratios (LREE/HREE=2~7). We suggest that Ion-adsorbed REEs in the regolithic zone of the epimetamorphic rocks are mainly sourced from REE-fluorocarbonate. Regolith of metamorphic tuff and metatuffite formed in Cryogenian in South Jiangxi Province should be included during REE-bearing properties evaluation and prospecting.

Key words: epimetamorphic rock; rare earth elements; ion-adsorption REE deposit; South Jiangxi Province; mineral deposits.

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金(Nos.K1506, YYWF201527); 中国地质调查项目(No.DD20160056)。

作者简介: 赵芝(1984—), 女, 高级工程师, 主要从事岩石、矿床地球化学研究。ORCID: 0000-0001-8122-7052. E-mail: zhaozhi_sun@163.com

* 通讯作者: 邹新勇, ORCID: 0000-0002-3860-7655. E-mail: 843274526@qq.com

引用格式: 赵芝, 陈郑辉, 邹新勇, 等, 2018. 赣南某离子吸附型稀土矿床浅变质岩的矿化特征. 地球科学, 43(10): 3652~3663.

0 引言

稀土是我国的优势矿产资源,北(方)有世界最大的白云鄂博矿,南(方)有独具优势的离子型矿,我国为全球稀土工业提供了大部分的资源。然而,因长期过度开采,我国的稀土资源尤其是重稀土资源保有储量不断下降、资源优势也快速降低。对此,近年来我国出台了一系列保护和限制开采政策。与此同时,国外为保障稀土资源的供应,掀起了稀土勘查(如东南亚、美国、巴西等国家的离子吸附型稀土以及大洋深海富稀土淤泥)、开发及研究的热潮(Murakami and Ishihara, 2008; Sanematsu *et al.*, 2009, 2013, 2015, 2016; Kato *et al.*, 2011; Imai *et al.*, 2013; Sanematsu and Watanabe, 2016; Pandrones *et al.*, 2017)。自 2011 年以来,国内加强了对稀土资源的管理,稀土资料的勘查、开发及研究取得了一系列进展。如在华南稀土成矿理论研究方面,认为稀土矿床可以是多类型、多岩性、多时代、多层次、多模式、多标志、多因继承、多相复合,矿床也可以分布在高纬度、高海拔地区(王登红等,2017;赵芝等,2017a,2017b)。赣南 GTZ 矿床是近年来新发现的一类矿床,稀土矿体赋存于南华系浅变质岩的风化壳中,为富铕轻稀土矿床。它的发现不仅为成矿母岩增添了新类型(多岩性、多层次及多模式之一),而且丰富了离子吸附型稀土成矿理论。在此矿床发现以前,

认为矿床的成矿母岩类型主要是花岗岩类和中酸性火山岩(杨岳清等,1981;宋云华和沈丽璞,1982,1986;包志伟,1992;池汝安等,2012;Sanematsu and Watanabe, 2016),国外也一直是在花岗岩风化壳中寻找此类矿床。

目前,对赣南浅变质岩离子吸附型稀土矿床的研究程度还很低,本文对 GTZ 稀土矿床的地表样品以及于都南岭科学深钻中的浅变质岩样品进行了岩石学、稀土矿物学及其地球化学特征方面的对比研究,旨在探讨浅变质岩中稀土元素的矿化特征。

1 区域地质

赣南大地构造位置上处于华南造山系南岭造山带赣南隆起,成矿区带属于Ⅱ级华南成矿省Ⅲ级南岭成矿带赣南隆起 W-Sn-REE 成矿亚带(徐志刚等,2008)。兴国—宁都一带前寒武系—寒武系构成褶皱—变质基底,古生界为沉积盖层,中生界为断陷盆地沉积(图 1)。区域上,青白口系—南华系按变质程度可分为中深成变质岩和浅变质岩,GTZ 离子吸附型稀土矿床主要分布在浅变质岩系风化壳中。

宁都青白口纪—南华纪浅变质岩出露较为广泛,呈北东东向、北东向展布,自下而上可划分为神山组、库里组、上施组、沙坝黄组、洪山组和坝里组(图 2)。神山组与库里组呈假整合接触或平行不整合

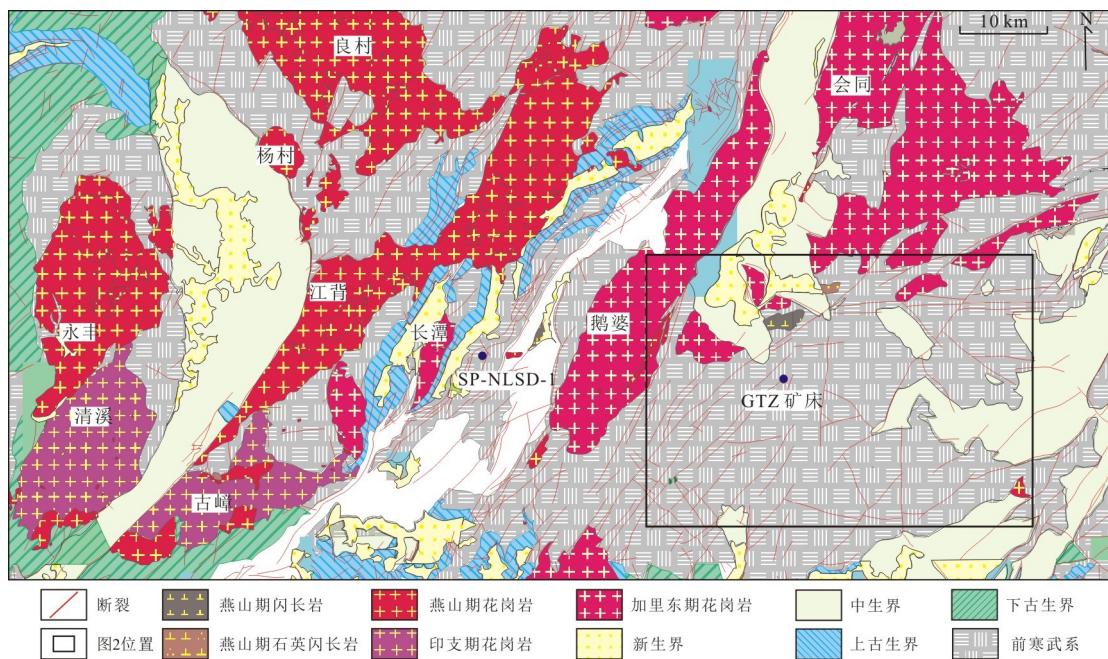


图 1 江西省兴国—宁都区域地质图

Fig.1 Geological map of Xingguo to Ningdu County, Jiangxi Province

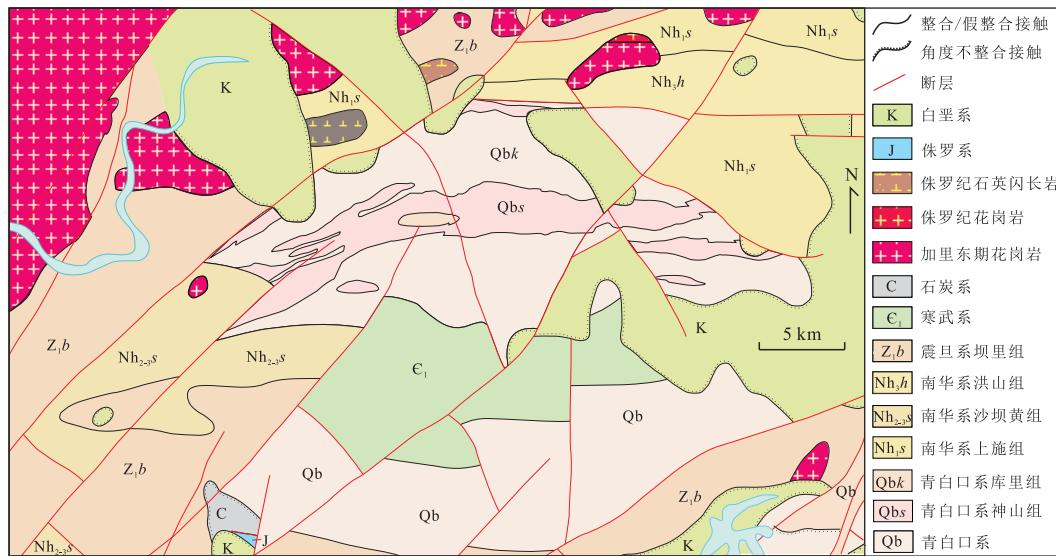


图 2 江西省宁都地区地质图

Fig.2 Geological map of Ningdu County, Jiangxi Province

据福建省冶金工业局,1972.1:20万宁化幅区域矿产调查报告.据南方工业学校,1997.1:5万长胜幅地质图及说明

接触,以黑色千枚岩类为主,与变质凝灰质粉砂岩、变质凝灰岩呈不等厚韵律互层,主体为含炭泥质沉积建造,厚度在约 260 m 至 >800 m. 库里组以中厚层变质沉淀灰岩、变质凝灰质砂岩为主,夹灰白、黄褐色中厚层变质砂岩、千枚岩等,为一套海相火山沉积建造,厚度为 658~1 146 m. 上施组与下伏库里组呈断层接触或整合接触,为紫灰色—浅灰色厚层块状变质砂岩、千枚岩,含变质沉淀灰岩或变质凝灰质砂岩,厚度为 423 m 至 >999 m. 沙坝黄组整合于下伏上施组之上,主体岩性为变余砾岩、砂砾岩、含砾凝灰质砂岩、不等粒杂砂岩,夹千枚岩、板岩和变质沉淀灰岩,厚 110~714 m. 洪山组平行不整合于上施组之上,为二云片岩、石墨石英片岩、白云石英片岩、石英岩,含磁铁矿、黄铁矿二云变粒岩,夹大理岩、斜长角闪岩及变余砾岩等,厚 317~916 m. 坎里组与沙坝黄组整合接触,主要岩性为灰、灰绿色变余长石石英杂砂岩、凝灰质砂岩、粉砂岩、沉淀灰岩与砂质板岩、千枚岩组成的韵律层,厚 238~2 600 m. 寒武系与青白口系呈断层接触或平行不整合接触,为一套浅变质的砂岩、粉砂岩、千枚岩夹含炭质千枚岩,具类复理石建造特征,有早寒武纪海绵骨针化石,总厚度大于 3 200 m.

国家深部探测—南岭科学钻工程(SP-NLSD-1)开孔位于于都—兴国—宁都三县交界地区(图 1),共获得 2 968.12 m 连续的岩心样品,其中 0~1 373.71 m 为青白口系,变质沉淀灰岩、变质沉淀灰质砂岩及凝灰质板岩组成,间夹 4 段流纹岩(赵正

等,2016),201.88 m 处的变质沉淀灰岩样品的锆石 U-Pb 年龄为 789.6 ± 2.9 Ma ($n = 105$, MSWD = 0.52)(郭娜欣,2015).

2 矿床地质

GTZ 稀土矿区位于宁都地区(图 1),由于缺乏精确的年代学依据,矿区地层时代归属有争议. 1:20 万宁化幅地质报告(福建省冶金工业局,1972.1:20 万宁化幅区域矿产调查报告)中将矿区地层归属为震旦纪,1:5 万长胜幅(南方工业学校,1997.1:5 万长胜幅地质图及说明)中归属为青白口纪,并划分为神山组和库里组(图 2,3). 变质沉淀灰岩的碎屑锆石 U-Pb 测年显示,最年轻的一组锆石的峰值年龄为 680 Ma ($n = 4$),其次为 737 Ma ($n = 46$, MSWD = 0.35) 和 797 Ma ($n = 35$, MSWD = 0.58),沉积时代为南华系. 矿区内神山组呈东西向带状分布于矿区北部,与上覆库里组呈平行不整合接触,岩石类型以千枚岩为主,含少量片岩. 库里组主要分布在矿区南部,呈东西向带状展布,与上覆中生代地层呈角度不整合接触,岩石类型主要为变沉淀灰岩类和变质碎屑岩类. 新近系主要沉积在主干河流及其支流的两岸、山涧溪流的两侧.

矿区地貌以山间盆地和丘陵为特征,且多为中低丘馒头状地貌,海拔在 220~500 m 之间,相对切深为 40~100 m,剥蚀不强烈. 风化壳以全覆式为主,局部

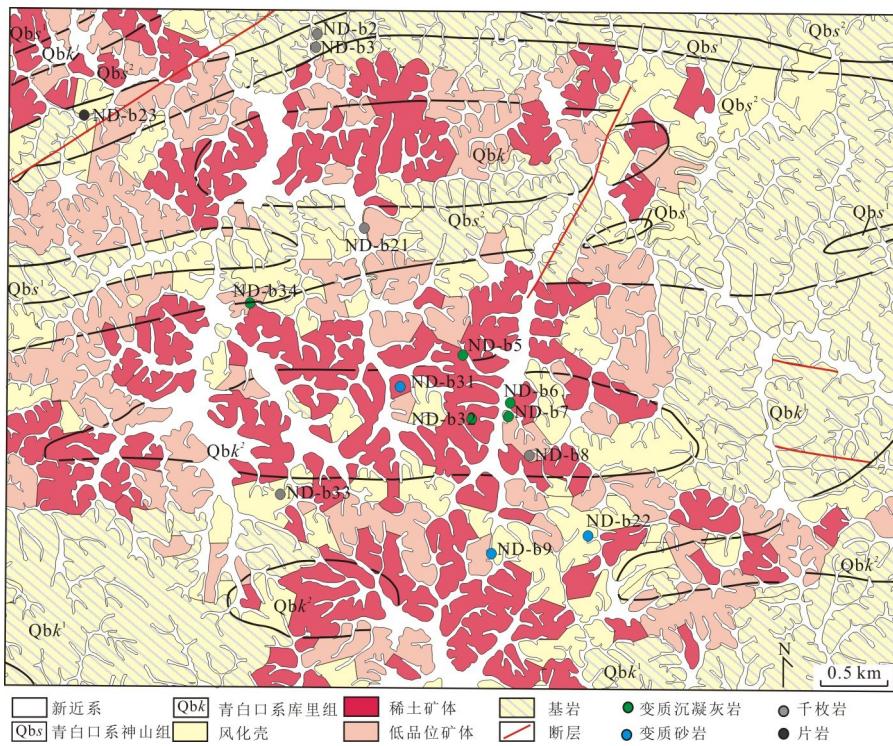


图 3 江西省宁都某离子吸附型稀土矿床地质图

Fig.3 Geological map of the studied ion-adsorption type REE deposit in Ningdu County, Jiangxi Province

表 1 江西省宁都某离子吸附型稀土矿床浅变质岩样品的岩石学特征

Table 1 Petrological characteristics of the studied epimetamorphic rock samples

样号	层位	变质岩岩石名称	矿物和含量(%)	结构构造	原岩类型
ND-b9	Pt ₃ k ¹	变质砂岩	砂粒矿物(>70%)主要是长石和石英, 基质矿物有绢云母、黑云母、长石和石英等	变余砂状结构, 变余层理	长石石英砂岩
ND-b22	Pt ₃ k ²	变质砂岩	砂粒矿物(>50%)主要是石英和少量长石, 基质矿物有绢云母、黑云母等	变余砂状结构, 变余层理	石英长石砂岩
ND-b31	Pt ₃ k ¹	变质砂岩	砂粒矿物(>70%)主要是长石和石英, 基质矿物有绢云母、黑云母、长石和石英等	变余砂状结构, 变余层理	长石石英砂岩
ND-b6	Pt ₃ k ²	变质沉凝灰岩	石英和岩屑(~5%), 基质矿物有绢云母、黑云母等	变余碎屑结构	沉凝灰岩
ND-b7	Pt ₃ k ²	变质凝灰岩	石英和长石晶屑(~8%), 基质矿物有绢云母、黑云母等	变余碎屑结构	凝灰岩
ND-b5	Pt ₃ k ¹	绢云变质沉凝灰岩	石英和岩屑(<5%), 基质为长英质矿物和绢云母等	变余碎屑结构	沉凝灰岩
ND-b32	Pt ₃ k ¹	绢云变质沉凝灰岩	变余斑晶(<20%)为碱性长石、斜长石及石英, 基质为绢云母、石英及少量的黑云母等	变余碎屑结构, 显微片状粒状变晶结构	沉凝灰岩
ND-b34	Pt ₃ k ¹	变质沉凝灰岩	石英和长石晶屑(~20%), 基质矿物有绢云母、黑云母、石英、长石等	变余碎屑结构, 块状构造	沉凝灰岩
ND-b2	Pt ₃ s ¹	绢云千枚岩	绢云母为主(>50%), 含黑云母、石英等	显微片状变晶结构, 千枚状构造	
ND-b8	Pt ₃ k ¹	绢云千枚岩	绢云母为主(>50%), 含黑云母、石英等	显微片状变晶结构, 千枚状构造	
ND-b21	Pt ₃ s ²	含磁铁矿绢云千枚岩	绢云母为主(>70%), 含磁铁矿、黑云母、绿泥石及石英等	斑状变晶结构, 显微片状变晶结构, 千枚状构造	泥质岩、粉砂质泥质岩, 部分中酸性火山凝灰岩
ND-b33	Pt ₃ k ¹	绢云石英千枚岩	石英(>70%)、绢云母(10%)、堇青石(4%)、黑云母(5%)、绿泥石(2%)	斑状变晶结构, 显微片状变晶结构, 千枚状构造	
ND-b23	Pt ₃ s ¹	白云母片岩	白云母(>65%), 石英(35%)	粒状片状变晶结构, 片状构造	泥质岩、粉砂质泥质岩, 部分中酸性火山凝灰岩

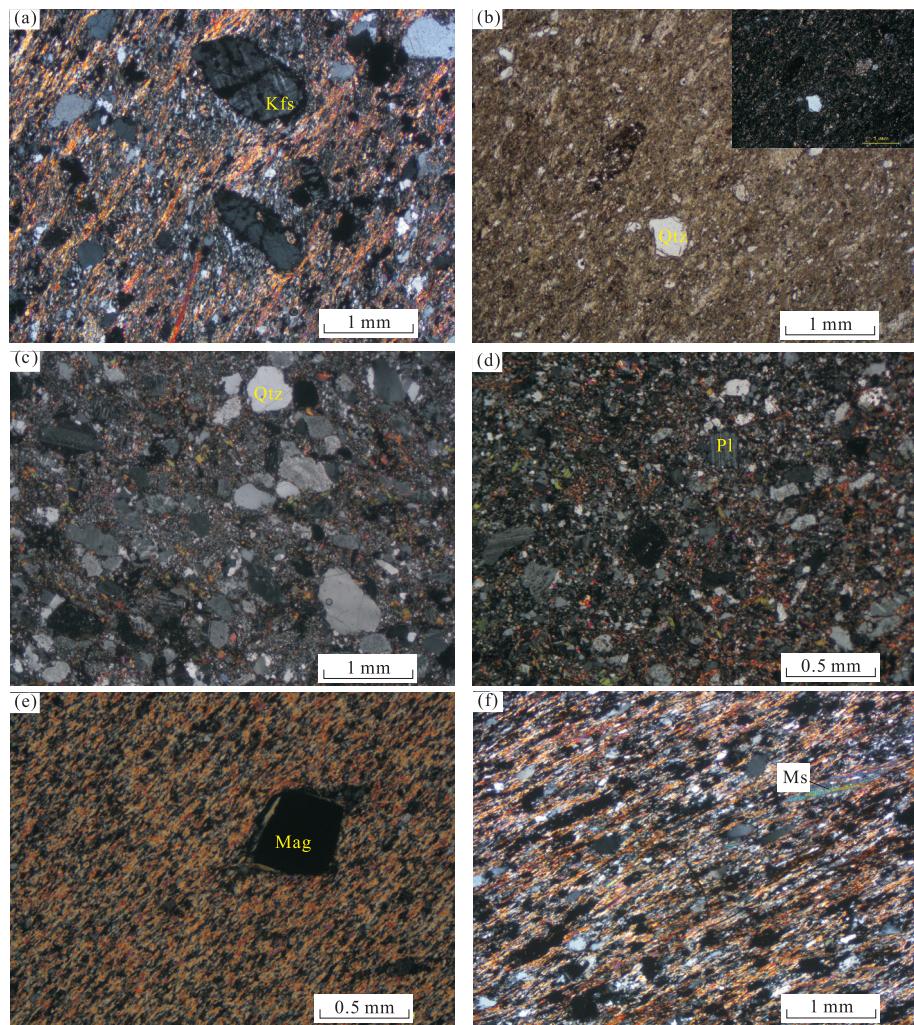


图 4 江西省宁都某离子吸附型稀土矿床代表性浅变质岩样品的显微特征

Fig.4 Photomicrographs showing representative textures of the studied epimetamorphic rock samples

a. 样品 ND-b7, 变质凝灰岩; b. 样品 ND-b5, 变质沉凝灰岩; c, d. 样品 ND-b9, ND-b31, 变质砂岩; e. 样品 ND-b21, 含磁铁矿绢云千枚岩; f. 样品 ND-b23, 白云母片岩; Kfs. 钾长石; Pl. 斜长石; Qtz. 石英; Mag. 磁铁矿; Ms. 白云母

出现裸脚式和残留式, 厚度在 0.95~18.4 m 之间, 平均为 8.4 m, 发育较厚处主要在变质凝灰质细砂岩、粉砂岩及变质沉凝灰岩中。矿体基本连续成片, 呈不规则多边形产于风化壳中, 具面型展布特点。风化壳主要由石英、长石、粘土及云母组成, 其中粘土矿物约占全风化壳的 26%~40%, 类型主要为高岭石和伊利石, 通常全风化层中伊利石含量高于高岭石。矿体为富铕轻稀土型, 轻稀土大部分(30%~88%)呈离子相被高岭石、伊利石等粘土矿物吸附。

矿区内地质类型主要为变质沉凝灰岩、变质砂岩、千枚岩及少量片岩类(表 1)。变质沉凝灰岩和变质沉凝灰岩为库里组的主要组成岩石, 呈青灰色、浅黄色, 为变余细屑、变余粉屑凝灰结构(图 4a, 4b), 变余层状或变余块状构造。原岩成分中除石英、长石等晶屑及岩屑(陆源碎屑较少)残余外, 发生不同程度

的重结晶和变质结晶, 原岩中的火山灰尘多已变为绢云母、黑云母等。岩石由凝灰岩和沉凝灰岩经低级区域变质作用形成。

变质砂岩主要分布于库里组中, 岩石多呈土黄色, 为变余砂状结构或变余粉砂状结构(图 4c, 4d), 变余层状构造, 由石英、长石、岩屑等原岩残余碎屑和新生的绢云母、绿泥石、黑云母、白云母组成。不同岩石中石英、长石含量差别较大。岩石主要由中细粒沉积碎屑岩经低级区域变质作用形成。

千枚岩类为神山组的主要岩石类型, 有绢云千枚岩、含磁铁矿绢云千枚岩(图 4e)、含炭质千枚岩等。岩石颜色较杂, 有浅灰、灰、灰绿、深灰、灰黑等色。显微鳞片变晶结构, 千枚状构造, 丝绢光泽较强, 有时可见小揉皱。矿物成分为绢云母、绿泥石、石英、钠长石、黑云母。

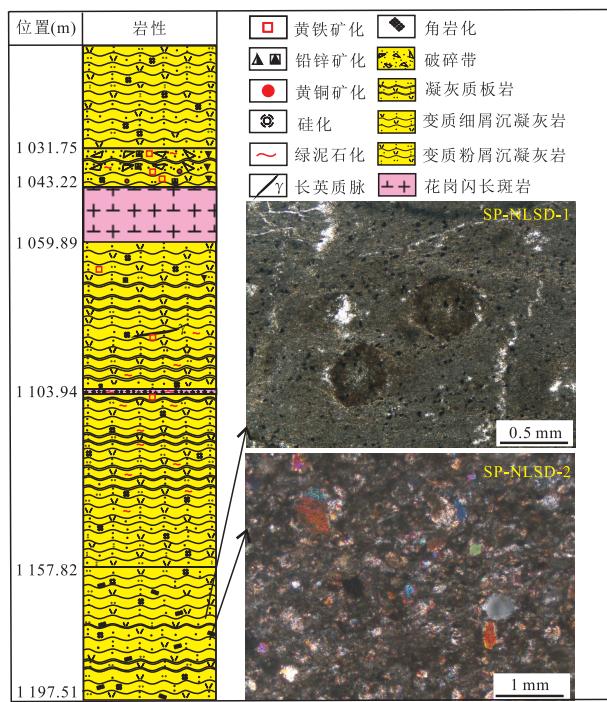


图 5 南岭科学钻 1 197.51~1 000 m 剖面

Fig.5 1 197.51~1 000 m core column in Nanling scientific drilling

片岩类分布在神山组中,白云母片岩(图 4f)呈灰色、浅灰色,为粒状片状变晶结构,片状构造,主要由白云母(>65%)和石英(35%)组成。

南岭科学钻工程 1 165~1 170.77 m 库里组岩心主要为变质沉凝灰岩夹凝灰质板岩(图 5).样品 SP-NLSD-1 为凝灰质板岩,斑点状构造,粘土和绢云母集合体形成斑点,分布于以粘土为主的基质中,斑点直径多在 0.4 mm 左右,岩石碳酸盐化、硅化强烈.样品 SP-NLSD-2 为变质沉凝灰岩,深灰色,具沉凝灰结构,层状构造,碎屑以石英、长石为主,次圆状,岩石常发生硅化、绿泥石化.

3 分析测试方法

矿物的电子探针分析由中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室完成,采用 JXA-8800R 电子探针分析仪和 Link ISI300 能谱仪,测试条件为加速电压 15 或 20 kV,激发电流 20 nA,电子束直径为 5 μm ,极小的 REE 矿物电子束直径为 1 μm .稀土矿物标样为五磷酸 X,如五磷酸镧、五磷酸铈等,为人造矿物.分析数据见附表 1、2.岩石样品的主量、微量元素及稀土元素分析测试由国家地质实验测试中心完成,主量元素测试方法为 X 射线荧光光谱(XRF),

使用仪器为荷兰帕纳科公司 Axios 波长色散 X 射线荧光光谱仪,测试误差小于 5%.稀土和微量元素分析方法为等离子质谱分析(ICP-MS),测试误差小于 5%,分析数据见附表 3.

4 分析测试结果

4.1 稀土矿物

独居石:各类浅变质岩中均有分布,多呈星点状散布在长石、石英等颗粒中,颗粒细小,形态不规则,粒径变化较大,多在 5~50 μm 之间(图 6a~6c).是含轻稀土的磷酸盐矿物, TR_2O_3 含量为 54.2%~68.9%,其中 Ce、La 和 Nd 的含量最高, P_2O_5 含量为 26.38%~33.53%, Th 和 U 的含量较低.在球粒陨石标准化的 REE 配分图中(图 7a),部分样品显示 Sm 负异常,还有部分样品显示 Pr 正异常.

磷钇矿:仅在样品 ND-b-32 中发现,呈港湾状分布在长石和云母颗粒中(图 6d),颗粒细小,粒径小于 10 μm ,含量少于独居石.是含重稀土的磷酸盐矿物, TR_2O_3 含量为 52%~61.7%,其中 Y_2O_3 含量为 37.42%~45.97%, P_2O_5 含量为 33.01%~36.98%.在球粒陨石标准化的 REE 配分图中显示 Tm 负异常(图 7b).

水磷镧矿:见于稀土矿区地表的样品中,颗粒细小(粒径约 10 μm),形态不规则,分布在石英、长石等矿物颗粒之间. TR_2O_3 含量为 28.7%~59.8%, Ce、La 和 Nd 的含量最高.在球粒陨石标准化的 REE 配分图中部分样品显示 Nd 正异常(图 7c).

新奇钙铈矿:仅见于样品 SP-NLSD-1 中,分布在凝灰质斑点中,大部分斑点中均有,呈粒状、针状、脉状等不规则状分布,粒径细小(<50 μm)(图 6e, 6f).凝灰质斑点成分复杂,有石英、钾长石、黑云母、磷灰石等.化学成分以富 REE(TR_2O_3 56.87%~71.67%)、F(56.87%~71.67%)和 CaO(7.04%~20.37%)为特征,稀土元素尤其富集 La、Ce、Nd, HREE 含量低($\sum \text{Y}_2\text{O}_3 = 7.80\% \sim 15.35\%$)(图 7d).由于此类矿物颗粒细小,加之流体交代并非是化学元素均一交代的过程,致使电子探针分析的元素含量变化较大.

4.2 岩石地球化学

矿区地表的样品遭受了不同程度的风化,风化蚀变指数 CIA 为 50%~75.54%,大部分样品 CIA ≈ 55%, LOI=4.09%~6.36%. SiO_2 含量变化较大,为 58.84%~74.48%, Al_2O_3 含量为 12.77%~

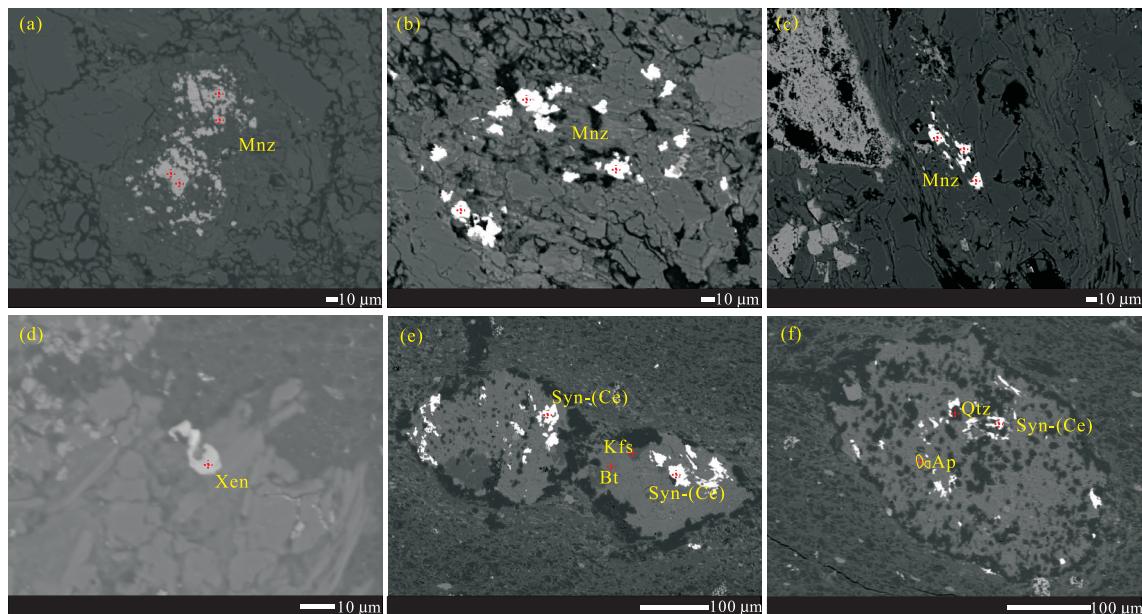


图 6 浅变质岩样品中稀土矿物的背散射图像

Fig.6 Back-scattered electron images of rare earth element minerals in the studied epimetamorphic rock samples
Mnz.独居石,Xen.磷钇矿,Syn-(Ce).新奇钙铈矿,Kfs.钾长石,Bt.黑云母,Qtz.石英,Ap.磷灰石

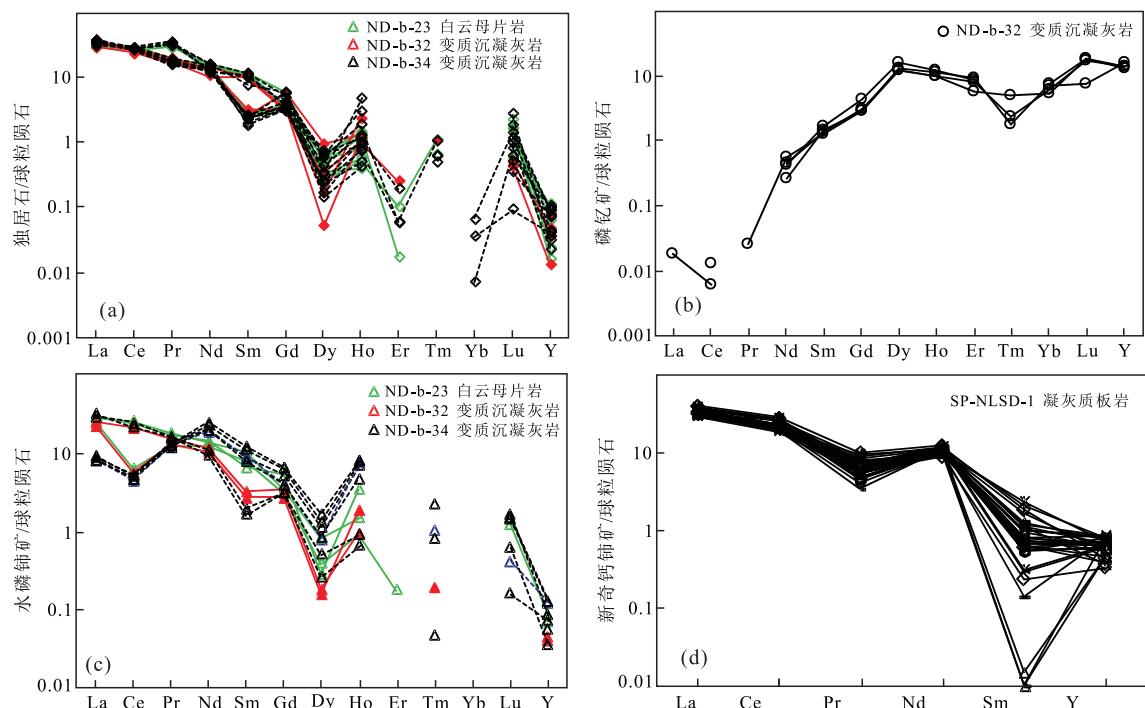


图 7 球粒陨石标准化的稀土矿物的REE配分曲线

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns for rare earth minerals

球粒陨石数据引自 Taylor and McLennan(1985)

21.58%, TFeO 含量为 1.77%~7.32%, K₂O 含量为 2%~6.97%, MgO 含量为 0.48%~1.81%, MnO 含量为 0.02%~0.15%。岩石具有低 CaO (<0.05%~1.11%)、P₂O₅ (<0.05%~0.11%) 和低

Na₂O (0.01%~3.06%) 的显著特征。REE 含量变化较大, 为 162×10^{-6} ~ 723×10^{-6} 。其中, 变质沉凝灰岩的 REE 含量普遍偏高, 6 件样品的均值为 436×10^{-6} , 高于南岭稀土成矿花岗岩的稀土含量均值

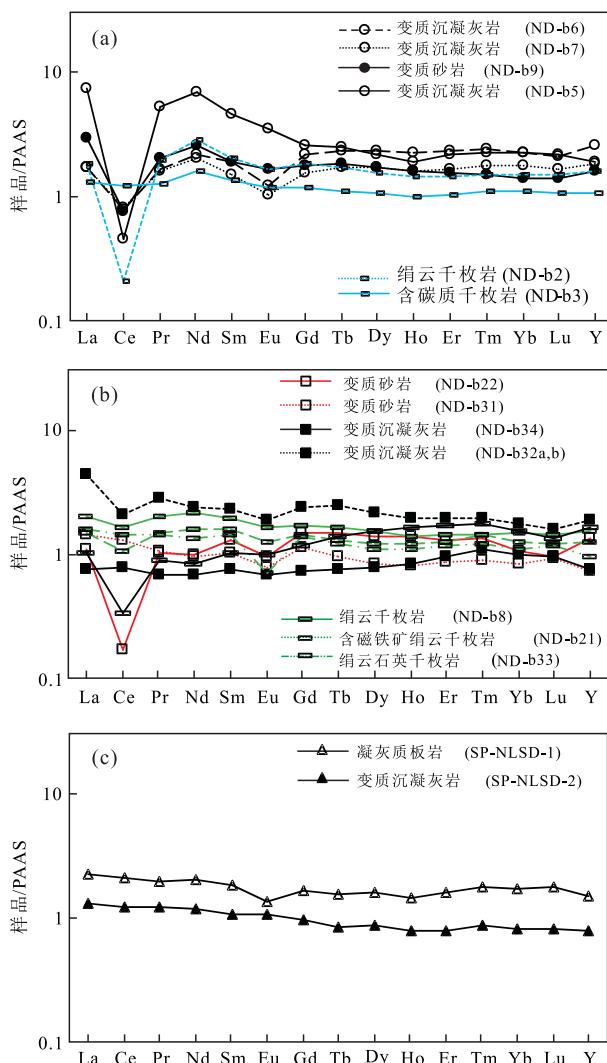


图 8 太古界后平均澳大利亚沉积岩标准化的浅变质岩样品的 REE 配分曲线

Fig. 8 PAAS normalized REE patterns of the studied epimetamorphic rock samples

PAAS 数据引自 McLennan(1989)

289×10^{-6} (赵芝等, 2014). 变质砂岩、千枚岩和片岩类中稀土含量也相对较高, 为 $166 \times 10^{-6} \sim 378 \times 10^{-6}$, 均值为 273.6×10^{-6} ($n=9$). 在太古界后平均澳大利亚沉积岩(PAAS)标准化的稀土配分图中, 根据 REE 配分曲线特征可分为两类: 第一类配分曲线呈“右倾式”, 为轻稀土富集型, $\text{LREE}/\text{HREE}=2 \sim 7$, 除个别样品外均具有显著的 Ce 负异常和 Nd 正异常(图 8a); 第二类轻、重稀土分馏程度差异较大, $\text{LREE}/\text{HREE}=1.6 \sim 6.6$, 无 Nd 正异常(图 8b).

南岭深钻两件新鲜样品的 SiO_2 含量为 $63.52\% \sim 67.08\%$, Al_2O_3 含量为 $13.99\% \sim 16.63\%$, TiFeO 含量为 $3.8\% \sim 4.4\%$, K_2O 含量为 $3.15\% \sim 5.50\%$, MgO 含量为 $0.96\% \sim 1.66\%$.

MnO 含量为 $0.13\% \sim 0.23\%$, TiO_2 含量为 $0.51\% \sim 0.54\%$, P_2O_5 含量为 $0.12\% \sim 0.23\%$, Na_2O 含量为 $1.96\% \sim 3.78\%$, CaO 含量为 $1.64\% \sim 2.11\%$. 可见风化过程中 Na_2O 和 CaO 易活化而亏损. REE 含量差异较大, $\sum \text{REE} = 243 \times 10^{-6} \sim 417 \times 10^{-6}$, 轻、重稀土分馏显著, $\text{LREE}/\text{HREE}=5$, 无 Ce 负异常. 在 PAAS 标准化稀土配分曲线图中(图 8c), REE 配分曲线均呈近水平, 略富集轻稀土.

5 讨论

5.1 稀土矿化特征

已有的研究表明, 花岗岩中 REE 大部分赋存于稀土独立矿物中, 少部分以类质同象或包体形式存在于造岩矿物和副矿物中(含稀土矿物)(Grommet and Silver, 1983; Topp *et al.*, 1984; Sawka and Chappell, 1988). 南岭稀土成矿花岗岩中稀土独立矿物的含量偏高, 且以易风化的稀土氟碳酸盐矿物、稀土氟化物和稀土硅酸盐矿物为主(杨岳清等, 1981; 吴澄宇, 1988; 吴澄宇等, 1993; Bao and Zhao, 2008; Ishihara *et al.*, 2008; 赵芝等, 2017a). 这些稀土独立矿物从成因上来说可以是岩浆结晶的, 如褐帘石、榍石、独居石及磷灰石等, 也可以是交代成因的, 如稀土氟碳酸盐矿物和稀土氟化物. 也就是说, 成矿花岗岩类中 REE 的富集是岩浆作用和流体交代作用叠加的结果, 流体交代作用不仅增加了岩石中稀土元素的含量, 而且使稀土矿物更易风化(Bern *et al.*, 2017; 赵芝等, 2017a).

浅变质岩中稀土元素又是如何富集的? 本文研究的 GTZ 稀土矿床岩石类型主要为变质沉凝灰岩、变质砂岩、千枚岩及少量片岩类, 属中低级变质岩类, 原岩类型可能为沉凝灰岩、泥岩及砂岩类. 沉凝灰岩中主要矿物为长石、石英及火山灰. 泥岩和砂岩类中主要矿物为长石、石英及泥质. 它们遭受低级变质作用后新生矿物以绢云母、绿泥石、磁铁矿、堇青石、白云母、黑云母为主. 浅变质岩类中主要的稀土独立矿物有新奇钙铈矿、独居石和磷钇矿. 电子探针分析结果显示, 石英、长石和上述变质新生矿物中稀土含量都比较低(以类质同象分散, TR_2O_3 含量低于 2%), 可见稀土元素主要赋存于稀土独立矿物中. 新奇钙铈矿是最为重要的稀土矿物, 不仅稀土含量高($\text{TR}_2\text{O}_3=56.87\% \sim 71.67\%$), 而且在弱酸性介质中比长石更易风化, 可能是浅变质岩类风化壳中离子相稀土的主要来源. 也正因为稀土氟碳酸盐类

矿物的易风化性,在矿区地表的基岩中很难保留。稀土氟碳酸盐类矿物中 F、CO₂ 是重要的物质组成,通常这些挥发组分聚集于热液阶段。矿区变质砂岩的碎屑锆石,除了岩浆锆石外也发现了热液交代的锆石。由此推测,赣南青白口系—南华系的浅变质岩类普遍遭受了流体交代作用。独居石有岩浆成因、热液成因、沉积成因以及变质成因,不同成因的独居石其形态、粒度及微量元素组成上均存在差异(宋天锐,1999;宋天锐等,2003;邱昆峰和杨立强,2011;王智琳等,2015;丁静等,2016)。本文的独居石,颗粒细小、形态不规则,Th 和 U 的含量很低,岩浆成因的可能性较小,至于是热液成因、沉积成因或是变质成因则很难分辨。磷钇矿广泛存在于岩浆、变质、沉积和热液作用中(刘志超等,2011),本次研究样品中的磷钇矿含量少、颗粒细小、形态不规则,也很难判断是哪种成因。独居石和磷钇矿因难风化在风化壳中以残留的矿物相存在,因此对离子吸附型稀土矿体来说是没有成矿物质的贡献的。GTZ 矿区变质沉淀灰岩中 REE 的含量整体高于变质砂岩,区域上也具有相似的规律(王臻等,2018),推测岩浆—热液阶段贡献的稀土含量高于沉积作用。综上所述,浅变质岩中 REE 的富集也是多种地质作用叠加的结果,除了岩浆结晶作用外(火山灰),还有流体交代等其他的地质作用。但是,对母岩最为有利的稀土矿化作用很可能是流体交代作用,这与花岗岩和中酸性火山岩中稀土矿化特征是相似的(赵芝等,2017a)。

浅变质岩类样品的稀土配分模式很大程度上反映的是稀土矿物组合的稀土配分。笔者对浅变质岩风化壳中离子相稀土的分析结果显示,Ce 和 HREE 亏损、Nd 并不富集。浅变质岩中轻稀土的富集可能是因新奇钙铈矿、独居石及水独居石等矿物的相对富集。岩石风化过程中 Ce³⁺ 氧化形成稳定的 Ce⁴⁺ 造成了 Ce 的负异常。部分岩石中 Nd 的富集可能是因富 Nd 独居石和水独居石的存在而引起的。部分岩石中重稀土的相对富集很可能是因为磷钇矿的含量稍高而引起。

5.2 区域成矿潜力

离子吸附型稀土矿床成因上具有“内生外成”的特征,即稀土矿化的母岩经过化学风化作用后稀土元素富集并成矿,矿化母岩和化学风化条件缺一不可。机械的风化作用(以四川牦牛坪稀土矿床为例)如氟碳铈矿在化学风化过程中极易风化的矿物仍然保留(李自静和刘琰,2018)。GTZ 矿床矿体赋存于较厚层的变质沉淀灰岩和沉淀灰岩风化壳中,千枚岩

和片岩出露区域风化壳往往不发育(图 3),或二者呈夹层分布在变质沉淀灰岩和变质砂岩风化壳中而破坏了风化壳的连续性。含炭质的千枚岩虽然易风化,但风化壳的厚度薄也不易形成工业矿体。变质砂岩的风化壳厚度较大,但是稀土含量变化较大,有的可成矿有的则不成矿(图 3)。这一方面可能是母岩中稀土矿物分布不均匀造成的,另一方面也与风化壳的发育程度有关。例如,变质石英长石砂岩(样品 ND-b-22)中石英的含量相对较高,致使风化程度较差。目前,在 GTZ 矿床外围的浅变质岩系中也发现了稀土矿体。

宜春—兴国—宁都一带青白口系—南华系浅变质岩发育,出露面积广泛,是否也有成矿潜力? 区域上自下而上划分为神山组、库里组、上施组、沙坝黄组、洪山组和坝里组。其中,库里组和上施组分布最为广泛,出露厚度较大(上千米)且以变质沉淀灰岩、变质沉淀灰岩和变质沉淀灰质砂岩为主,其风化壳是有利的含矿层。当然,除了具备矿化的母岩外,区域地形、地貌条件、风化程度也是影响稀土元素次生富集的重要因素(杨岳清等,1981; Bao and Zhao, 2008; 赵芝等,2017a)。因此,当其风化壳具有一定厚度、风化程度适中时才具有一定的稀土成矿潜力。

6 结论

江西宁都 GTZ 离子吸附型稀土矿床基岩类型有变质沉淀灰岩、变质砂岩、千枚岩及片岩,岩石的稀土含量较高,为 $162 \times 10^{-6} \sim 723 \times 10^{-6}$, 均富集轻稀土,稀土元素主要赋存于稀土磷酸盐和稀土氟碳酸盐矿物中,后者因易化学风化而难保存,仅在南岭科学深钻的凝灰质板岩样品中发现。南华系变质沉淀灰岩和变质砂岩出露厚度大、易风化,是稀土矿体的主要赋存层位;千枚岩和片岩不易风化,多呈夹层产出。赣南地区青白口系—南华系中厚层变质沉淀灰岩和变质沉淀灰岩风化壳具有较好的稀土成矿潜力。

致谢:感谢多位匿名审稿专家对本文提出的宝贵意见。

References

- Bao, Z. W., 1992. A Geochemical Study of the Granitoid Weathering Crust in Southeast China. *Geochimica*, 21 (2): 166—174 (in Chinese with English abstract).
- Bao, Z. W., Zhao, Z. H., 2008. Geochemistry of Mineralization with Exchangeable REY in the Weathering Crusts of

- Granitic Rocks in South China. *Ore Geology Reviews*, 33 (3—4): 519—535. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2007.03.005>
- Bern, C. R., Yesavage, T., Foley, N. K., 2017. Ion-Adsorption REEs in Regolith of the Liberty Hill Pluton, South Carolina, USA: An Effect of Hydrothermal Alteration. *Journal of Geochemical Exploration*, 172: 29—40. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.09.009>
- Chi, R. A., Tian, J., Luo, X. P., et al., 2012. The Basic Research on the Weathered Crust Elution-Deposited Rare Earth Ores. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 3 (4): 1—13 (in Chinese with English abstract).
- Ding, J., Song, T. R., Shi, Y. R., 2016. Occurrence and Origin of Monazite and Rutiles from Sedimentary Rock of Chuanlinggou Formation in Changping Area of Beijing. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 38 (2): 172—181 (in Chinese with English abstract).
- Grommet, L. P., Silver, L. T., 1983. A Rare Earth Element Distribution among Minerals in a Granodiorite and their Petrogenetic Implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47(5): 925—937.
- Guo, N. X., 2015. Genesis Relationship between Two Types of Mineralization in Yinkeng Ore Field, Southern Jiangxi Province, Nanling Region (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Imai, A., Yonezu, K., Sanematsu, K., et al., 2013. Rare Earth Elements in Hydrothermally Altered Granitic Rocks in the Ranong and Takua Pa Tin-Field, Southern Thailand. *Resource Geology*, 63(1): 84—98. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2012.00212.x>
- Ishihara, S., Hua, R. M., Hoshino, M., et al., 2008. REE Abundance and REE Minerals in Granitic Rocks in the Nanling Range, Jiangxi Province, Southern China, and Generation of the REE-Rich Weathered Crust Deposits. *Resource Geology*, 58(4): 355—372. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2008.00070.x>
- Kato, Y., Fujinaga, K., Nakamura, K., et al., 2011. Deep-Sea Mud in the Pacific Ocean as a Potential Resource for Rare-Earth Elements. *Nature Geoscience*, 4(8): 535—539. <https://doi.org/10.1038/ngeo1185>
- Li, Z. J., Liu, Y., 2018. Ore Types and Genesis of Weathered Deposits in Mianning-Dechang REE Ore Belt, Western Sichuan Province, Southwestern China. *Earth Science*, 43(4): 1307—1320 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.722>
- Liu, Z. C., Wu, F. Y., Guo, C. L., et al., 2011. In Situ U-Pb Dating of Xenotime by Laser Ablation (LA)-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 56(33): 2772—2781 (in Chinese).
- McLennan, S. M., 1989. Rare Earth Elements in Sedimentary Rocks: Influence on Provenance and Sedimentary Processes. *Reviews in Mineralogy*, 21(8): 169—200.
- Murakami, H., Ishihara, S., 2008. REE Mineralization of Weathered Crust and Clay Sediment on Granitic Rocks in the Sanyo Belt, SW Japan and the Southern Jiangxi Province, China. *Resource Geology*, 58(4): 373—401. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2008.00071.x>
- Padrones, J. T., Imai, A., Takahashi, R., 2017. Geochemical Behavior of Rare Earth Elements in Weathered Granitic Rocks in Northern Palawan, Philippines. *Resource Geology*, 67(3): 231—253. <https://doi.org/10.1111/rge.12123>
- Qiu, K. F., Yang, L. Q., 2011. Genetic Feature of Monazite and Its U-Th-Pb Dating: Critical Considerations on the Tectonic Evolution of Sanjiang Tethys. *Acta Petrologica Sinica*, 27 (9): 2721—2732 (in Chinese with English abstract).
- Sanematsu, K., Ejima, T., Kon, Y., et al., 2016. Fractionation of Rare-Earth Elements during Magmatic Differentiation and Weathering of Calc-Alkaline Granites in Southern Myanmar. *Mineralogical Magazine*, 80(1): 77—102. <https://doi.org/10.1180/minmag.2016.080.053>
- Sanematsu, K., Kon, Y., Imai, A., 2015. Influence of Phosphate on Mobility and Adsorption of REEs during Weathering of Granites in Thailand. *Journal of Asian Earth Sciences*, 111(1): 14—30. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.05.018>
- Sanematsu, K., Kon, Y., Imai, A., et al., 2013. Geochemical and Mineralogical Characteristics of Ion-Adsorption Type REE Mineralization in Phuket, Thailand. *Mineralium Deposita*, 48(4): 437—451. <https://doi.org/10.1007/s00126-011-0380-5>
- Sanematsu, K., Murakami, H., Watanabe, Y., et al., 2009. Enrichment of Rare Earth Elements (REE) in Granitic Rocks and Their Weathered Crusts in Central and Southern Laos. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 60(11—12): 527—558. <https://doi.org/10.9795/bullgsj.60.527>
- Sanematsu, K., Watanabe, K., 2016. Characteristics and Genesis of Ion-Adsorption Type Rare Earth Element Deposits. In: Verplanck, P. L., Hitzman, M. W., eds., *Reviews in Economic Geology*. Society of Economic Geologists, 18: 55—79.
- Sawka, W. N., Chappell, B. W., 1988. Fractionation of Uranium, Thorium and Rare Earth Elements in a Vertically Zoned Granodiorite: Implications for Heat Production Distributions in the Sierra Nevada Batholith, California, U. S. A. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(5): 1131—1143.

- https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90267-0
- Song, T. R., 1999. Discovery of Authigenic Rare Earth Mineral Monazite in Precambrian Sedimentary Rock of Dalian Area and Its Significance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(Suppl.):663—667 (in Chinese with English abstract).
- Song, T. R., He, Z. J., Wan, Y. S., et al., 2003. Discovery of Authigenic Monazite in Precambrian Sedimentary Rock and Its Significance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(1):118—124 (in Chinese with English abstract).
- Song, Y. H., Shen, L. P., 1982. Discussion on Clay Minerals Occurring in the Weathered Crust of a Certain Acid Volcanic Rock in Jiangxi Province and Their Formation Conditions. *Acta Mineralogica Acta*, 2(3):207—212 (in Chinese with English abstract).
- Song, Y. H., Shen, L. P., 1986. REE Geochemistry of the Weathered Crust of Acid Volcanic Rocks—An Experimental Study. *Geochimica*, 2(3):225—234 (in Chinese with English abstract).
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell, London, 57—72.
- Topp, S. E., Salbu, B., Roaldset, E., et al., 1984. Vertical Distribution of Trace Elements in Laterite Soil (Suriname). *Chemical Geology*, 47(1—2):159—174. https://doi.org/10.1016/0009-2541(84)90104-9
- Wang, D. H., Zhao, Z., Yu, Y., et al., 2017. A Review of the Achievements in the Survey and Study of Ion-Absorption Type REE Deposit in China. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(3):317—325 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z., Zhao, Z., Zou, X. Y., et al., 2018. Petrogeochemical Characteristics and Metallogenetic Potential of Epimetamorphic Rocks in South Jiangxi Province. *Rock and Mineral Analysis*, 37(1):96—107 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. L., Xu, D. R., Monika, A. K., et al., 2015. Genesis and CHIME Dating on Monazite in the Shilu Iron Ore Deposite, Hainan Province of South China, and Its Geological Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1):200—216 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. Y., 1988. The Study of Ion-Adsorbed Type of Rare Earth Deposits in Weathering Crust from South Jiangxi and North Guangdong Provinces (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. Y., Lu, H. L., Xu, L. M., et al., 1993. A Preliminary Study on Modes of Occurrence of Rare Earth Elements in the Tropical Subtropical Weathering Crust of Nanling Region. *Mineral Deposits*, 12(4):297—307 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. G., Chen, Y. C., Wang, D. H., et al., 2008. Division of Metallogenetic Belts in China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yang, Y. Q., Hu, Z. S., Luo, Z. M., 1981. Geological Characteristic of Mineralization of Rare Earth Deposit of the Ion-Absorption Type and Their Prospecting Direction. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 2(1):102—118 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z., Wang, D. H., Chen, Z. Y., et al., 2014. Metallogenetic Specialization of Rare Earth Mineralized Igneous Rocks in the Eastern Nanling Region. *Geotectonica et Metallogenesis*, 38(2):255—263 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z., Wang, D. H., Chen, Z. H., et al., 2017a. Progress of Research on Metallogenetic Regularity of Ion-Adsorption Type REE Deposit in the Nanling Range. *Acta Geologica Sinica*, 91(12):2814—2827 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z., Wang, D. H., Pan, H., et al., 2017b. REE Geochemistry of a Weathering Profile in Guangxi, Southern China, and Genesis of Ion-Adsorption Type REE Deposit. *Earth science*, 42(10):1697—1706 (in Chinese with English abstract). https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.115
- Zhao, Z., Wang, Z. Q., Chen, Y. C., et al., 2016. 381 Ma Rhylolite Found by Nanling Scientific Drilling in Qingbaikouan System. *Geology in China*, 43(5):1579—1584 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 包志伟, 1992. 华南花岗岩风化壳稀土元素地球化学研究. 地球化学, 21(2):166—174.
- 池汝安, 田君, 罗仙平, 等, 2012. 风化壳淋积型稀土矿的基础研究. 有色金属科学与工程, 3(4):1—13.
- 丁静, 宋天锐, 石玉若, 2016. 北京昌平地区串岭沟组沉积岩中独居石、金红石赋存状态及其成因. 地球科学与环境学报, 38(2):172—181.
- 郭娜欣, 2015. 南岭银坑矿田两种类型矿床成因关系研究(博士论文). 北京: 中国地质科学院.
- 李自静, 刘琰, 2018. 川西冕宁—德昌 REE 矿带风化型矿床的矿石类型及成因. 地球科学, 43(4):1307—1320. https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.722
- 刘志超, 吴福元, 郭春丽, 等, 2011. 磷钇矿 U-Pb 年龄激光原位 ICP-MS 测定. 科学通报, 56(33):2772—2781.
- 邱昆峰, 杨立强, 2011. 独居石成因特征与 U-Th-Pb 定年及三江特提斯构造演化研究例析. 岩石学报, 27(9):2721—2732.
- 宋天锐, 1999. 大连地区前寒武纪沉积岩中发现自生独居石及其意义. 沉积学报, 17(S1):663—667.
- 宋天锐, 和政军, 万渝生, 等, 2003. 前寒武纪沉积岩独居石中

- 自生独居石的发现及其意义.沉积学报,21(1):118—124.
- 宋云华,沈丽璞.1982.江西某酸性火山岩风化壳中粘土矿物及其形成条件的讨论.矿物学报,2(3):207—212.
- 宋云华,沈丽璞.1986.酸性火山岩类风化壳中稀土元素的地球化学实验研究.地球化学,2(3):225—234.
- 王登红,赵芝,于扬,等,2017.我国离子吸附型稀土矿产科学的研究和调查评价新进展.地球学报,38(3):317—325.
- 王臻,赵芝,邹新勇,等,2018.赣南浅变质岩岩石地球化学特征及稀土成矿潜力研究.岩矿测试,37(1):96—107.
- 王智琳,许德如,Monika, A.K.,等,2015.海南石碌铁矿独居石的成因类型、化学定年及地质意义.岩石学报,31(1):200—216.
- 吴澄宇.1988.赣南粤北地区风化壳离子吸附型稀土矿床研究(博士论文).北京:中国地质科学院.
- 吴澄宇,卢海龙,徐磊明,等,1993.南岭热带—亚热带风化壳中稀土元素赋存形式的初步研究.矿床地质,12(4):297—307.
- 徐志刚,陈毓川,王登红,等,2008.中国成矿区带划分方案.北京:地质出版社.
- 杨岳清,胡淙声,罗展明,1981.离子吸附型稀土矿床成矿地质特征及找矿方向.中国地质科学院院报矿床地质研究所分刊,2(1):102—118.
- 赵正,王宗起,陈毓川,等,2016.南岭科学钻探青白口系中发现381 Ma流纹岩.中国地质,43(5):1579—1584.
- 赵芝,王登红,陈振宇,等,2014.南岭东段与稀土矿有关岩浆岩的成矿专属性特征.大地构造与成矿学,38(2):255—263.
- 赵芝,王登红,陈郑辉,等,2017a.南岭离子吸附型稀土矿床成矿规律研究新进展.地质学报,91(12):2814—2827.
- 赵芝,王登红,潘华,等,2017b.广西某地花岗岩风化壳中稀土元素特征与iRee矿床成矿机制.地球科学,42(10):1697—1706.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.115>

附表 1 稀土磷酸盐矿物的化学元素分析测试结果(%)
Appendix Table 1 Geochemical composition of the rare earth phosphate samples (%)

	F	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	FeO	UO ₂	ThO ₂	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	Dy ₂ O ₃	Ho ₂ O ₃	Er ₂ O ₃	Tm ₂ O ₃	Yb ₂ O ₃	Lu ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	Total	TR ₂ O ₃
独居石																						
ND-b-34-1	0.47	0.37	1.12	30.14	0.15	0.01	0.18	13.06	29.32	4.88	13.05	3.08	1.71	0.28	0.00	0.02	0.00	0.02	0.21	98.4	65.9	
ND-b-34-11	0.59	0.73	1.64	29.41	0.55	0.20	2.12	15.05	30.56	2.52	10.88	0.64	1.26	0.30	0.11	0.06	0.00	0.00	0.03	0.28	96.9	61.7
ND-b-34-13	0.67	3.60	4.02	29.23	0.41	0.16	0.33	14.44	30.04	2.64	10.22	2.86	1.31	0.26	0.18	0.02	0.00	0.02	0.06	0.26	100.7	62.3
ND-b-34-14	1.32	3.61	4.05	28.41	0.52	0.07	0.20	14.29	30.39	2.76	9.94	0.67	1.42	0.31	0.08	0.00	0.00	0.00	0.08	0.26	98.4	60.2
ND-b-34-16	1.15	0.90	1.44	30.06	0.26	0.10	1.43	15.15	30.87	2.69	9.74	2.67	1.35	0.19	0.13	0.00	0.00	0.00	0.04	0.20	98.4	63.0
ND-b-34-19	0.58	0.31	1.14	29.42	0.21	0.06	0.07	15.06	30.52	5.27	13.15	2.02	1.98	0.15	0.46	0.00	0.03	0.00	0.00	0.30	100.7	68.9
ND-b-34-4	0.84	0.37	1.65	28.06	0.11	0.13	3.55	15.87	30.57	2.92	10.83	0.60	1.26	0.11	0.10	0.00	0.00	0.01	0.00	0.12	97.1	62.4
ND-b-34-5	0.47	0.22	1.37	29.22	0.15	0.09	3.83	14.72	30.93	5.40	10.19	0.67	2.06	0.07	0.08	0.02	0.04	0.00	0.04	0.06	99.6	64.3
ND-b-34-6	0.95	0.51	1.36	28.80	0.15	0.06	2.67	14.36	31.81	5.67	10.07	0.53	1.18	0.14	0.10	0.00	0.03	0.00	0.05	0.13	98.6	64.1
ND-b-34-7	0.79	1.77	2.65	29.27	0.41	0.11	2.01	15.63	29.62	2.49	11.27	0.64	1.04	0.10	0.05	0.00	0.00	0.00	0.12	0.09	98.1	61.1
ND-b-34-8	1.27	0.29	1.08	29.15	0.15	0.10	2.53	14.77	30.69	2.98	11.91	0.61	1.21	0.06	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	96.9	62.4
ND-b-34b-1	1.10	0.21	1.61	28.11	0.19	0.10	5.90	14.94	29.99	2.62	10.94	0.48	1.14	0.11	0.07	0.00	0.00	0.00	0.02	0.12	97.6	60.4
ND-b-32-1	0.78	1.43	3.10	30.34	0.19	0.09	0.88	14.48	28.07	2.73	11.56	2.75	1.16	0.07	0.22	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	97.9	61.1
ND-b-32-10	0.91	0.06	0.83	33.53	0.16	0.08	3.87	15.36	28.85	2.78	8.57	2.60	1.14	0.15	0.10	0.07	0.00	0.00	0.00	0.10	99.2	59.7
ND-b-32-12	0.76	0.15	0.67	30.49	1.25	0.07	1.87	14.98	30.02	3.14	10.80	0.68	2.02	0.41	0.13	0.00	0.04	0.00	0.00	0.23	97.7	62.5
ND-b-32-3	0.79	4.34	6.80	30.47	0.13	0.08	0.97	12.41	25.94	2.61	11.00	0.85	1.13	0.02	0.11	0.00	0.00	0.00	0.02	0.14	97.8	54.2
ND-b-23-3	0.87	0.08	2.45	29.28	0.08	0.17	2.51	15.08	29.69	2.74	11.49	0.77	1.24	0.16	0.04	0.00	0.00	0.00	0.07	0.05	96.8	61.3
ND-b-23-6	0.70	0.04	1.51	29.85	0.18	0.12	0.90	14.12	32.01	3.08	11.11	2.88	1.27	0.23	0.07	0.00	0.00	0.00	0.04	0.28	98.4	65.1
ND-b-23-7	0.81	0.09	11.51	26.38	0.16	0.22	1.29	12.09	27.82	4.42	11.78	2.85	1.23	0.23	0.14	0.01	0.00	0.07	0.18	101.3	60.8	
ND-b-23-8	1.13	0.04	0.94	28.89	0.24	0.06	0.85	14.70	30.50	5.11	11.41	0.74	1.18	0.14	0.06	0.00	0.00	0.10	0.07	96.1	64.0	
ND-b-23-9	0.89	0.09	1.56	29.65	1.49	0.03	0.93	14.91	30.07	2.68	12.28	0.73	1.21	0.11	0.05	0.03	0.05	0.00	0.00	0.22	96.9	62.3
ND-b-23-10	1.21	0.00	0.56	30.69	0.17	0.00	0.88	13.92	31.36	2.84	12.74	2.93	2.02	0.21	0.12	0.00	0.03	0.00	0.00	0.29	99.9	66.4
ND-b-23-11	0.90	0.24	7.46	26.81	2.16	0.04	1.16	12.05	29.45	2.64	10.96	2.87	1.18	0.30	0.14	0.00	0.00	0.03	0.32	98.7	59.9	

附表 1

	F	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	FeO	UO ₂	ThO ₂	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	Dy ₂ O ₃	Ho ₂ O ₃	Er ₂ O ₃	Tm ₂ O ₃	Yb ₂ O ₃	Lu ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	Total	TR ₂ O ₃
水磷铜矿 ^a																						
ND-b-34-9	0.62	3.39	10.03	21.41	0.55	0.17	2.94	12.37	26.69	2.50	9.00	0.51	1.09	0.11	0.07	0.00	0.00	0.03	0.10	91.6	52.5	
ND-b-34b-2	0.44	4.58	8.48	24.52	0.29	0.06	1.36	13.56	23.89	2.54	7.69	0.44	1.08	0.22	0.09	0.00	0.03	0.00	0.01	0.21	89.5	49.8
ND-b-34b-3	1.65	0.28	3.17	22.95	0.31	0.05	0.00	3.53	5.26	2.03	20.49	3.30	2.32	0.73	0.79	0.00	0.09	0.00	0.07	0.25	67.3	38.9
ND-b-34b-5	0.93	0.39	2.90	17.19	0.62	0.05	0.04	3.98	5.66	2.17	16.21	2.25	1.82	0.49	0.68	0.00	0.00	0.00	0.06	0.36	55.8	33.7
ND-b-34b-6	0.90	0.23	13.95	19.29	0.45	0.08	0.01	3.47	4.94	1.91	15.35	2.43	1.41	0.35	0.75	0.00	0.04	0.00	0.02	0.35	65.9	31.0
ND-b-34b-7	0.24	0.69	11.72	19.79	0.66	0.05	0.10	3.49	5.25	1.92	16.47	2.13	1.40	0.38	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	64.9	31.7
ND-b-34b-8	0.74	0.07	19.62	21.92	0.16	0.08	0.01	3.76	5.86	2.13	18.72	2.99	2.28	0.58	0.77	0.00	0.00	0.00	0.07	0.37	80.1	37.5
ND-b-32-14	0.81	4.04	5.21	24.91	2.53	0.01	0.74	10.68	23.58	2.46	9.76	0.88	1.18	0.08	0.09	0.00	0.01	0.00	0.00	0.13	87.1	48.8
ND-b-32-15	0.85	0.33	36.53	22.36	0.02	0.06	0.64	9.52	6.34	2.09	8.72	0.72	0.95	0.07	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	89.5	28.7
ND-b-23-1	0.66	0.21	1.69	27.08	0.09	0.00	2.05	12.52	26.72	2.73	11.67	1.75	1.83	0.12	0.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	89.6	57.8
ND-b-23-12	0.78	0.00	0.67	23.39	0.30	0.22	1.58	12.10	28.49	2.83	11.49	2.84	1.25	0.35	0.14	0.00	0.00	0.05	0.25	86.7	59.8	
ND-b-23-4	0.31	0.88	12.65	22.36	9.75	0.04	1.25	10.93	7.06	1.99	10.28	2.20	1.08	0.17	0.09	0.05	0.00	0.00	0.00	0.20	81.3	34.1
磷钇矿 ^a																						
ND-b-32-13	0.29	0.16	1.30	33.01	0.10	0.22	1.01	0.00	0.01	0.00	0.36	0.47	1.59	7.20	1.19	2.54	0.00	2.02	0.34	45.97	97.8	61.7
ND-b-32-4	0.60	1.33	4.86	35.95	0.12	0.09	0.42	0.01	0.01	0.00	0.37	0.38	1.13	5.53	0.98	2.33	0.10	1.81	0.74	41.15	97.9	54.5
ND-b-32-4	0.78	1.66	3.95	36.26	0.29	0.06	0.25	0.00	0.00	0.00	0.22	0.40	1.06	5.27	0.99	1.68	0.22	1.54	0.81	41.74	97.2	53.9
ND-b-32-6	0.70	0.20	7.04	36.98	0.06	0.23	1.27	0.00	0.00	0.00	0.48	0.34	1.07	5.77	1.15	2.65	0.08	2.20	0.81	37.42	98.4	52.0

附表 2 新奇钙钇矿的化学元素分析测试结果(%)

Appendix Table 2 Geochemical composition of the synchysite-(Ce) (%)

	F	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	FeO	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	ThO ₂	UO ₂	Total	TR ₂ O ₃
SP-NLSD-1-10	8.41	0.79	0.38	0.80	7.04	4.18	16.70	30.58	1.05	9.11	0.31	1.04	0.20	0.02	80.61	58.79
SP-NLSD-1-13	9.32	0.78	0.30	0.48	10.37	10.29	14.41	23.42	0.91	7.32	0.06	0.95	0.07	0.04	78.70	47.07
SP-NLSD-1-23	8.03	0.94	2.16	4.06	10.75	3.28	17.17	31.36	1.61	10.05	0.17	1.08	0.08	0.03	90.78	61.44
SP-NLSD-1-19	10.43	0.38	1.05	2.14	10.76	1.85	16.81	30.53	1.14	10.09	0.49	1.24	0.05	0.01	86.97	60.31
SP-NLSD-1-38	7.50	0.38	0.96	1.44	12.07	1.94	13.76	28.87	0.75	8.85	0.18	1.85	0.04	0.02	78.62	54.27
SP-NLSD-1-11	10.91	0.07	0.85	1.78	12.49	1.77	16.18	30.51	1.13	9.85	0.18	1.30	0.50	0.03	87.55	59.15
SP-NLSD-1-7	8.31	0.37	0.35	0.13	12.72	2.63	16.23	28.40	0.95	8.88	0.00	1.32	0.03	0.02	80.35	55.79
SP-NLSD-1-34	8.93	0.00	0.14	1.59	14.57	0.77	15.71	29.17	1.48	10.15	0.08	1.90	0.04	0.04	84.58	58.50
SP-NLSD-1-40	8.23	0.12	0.84	1.05	16.12	1.68	14.75	26.33	0.73	8.82	0.00	2.28	0.00	0.04	80.98	52.90
SP-NLSD-1-1	4.19	0.00	0.32	0.30	16.58	0.80	12.84	24.05	1.56	9.27	0.16	2.01	0.00	0.03	72.10	49.89
SP-NLSD-1-18	6.85	0.00	0.05	0.20	16.58	1.22	13.54	26.22	1.38	9.21	0.30	1.88	0.08	0.02	77.51	52.54
SP-NLSD-1-22	6.03	0.44	1.54	2.37	16.77	3.01	13.40	25.76	1.30	8.11	0.00	1.29	0.04	0.02	80.09	49.86
SP-NLSD-1-33	5.13	0.00	0.00	0.10	17.31	0.64	15.03	25.41	0.96	8.72	0.19	2.07	0.06	0.05	75.64	52.36
SP-NI-SD-1-32	5.47	0.00	0.00	0.13	17.35	0.55	15.67	26.03	1.01	8.87	0.22	1.92	0.03	0.01	77.25	53.71
SP-NLSD-1-36	6.27	0.00	0.00	0.00	17.47	0.41	14.60	24.97	0.71	8.67	0.14	2.30	0.00	0.05	75.59	51.39
SP-NLSD-1-5	5.94	0.00	0.07	0.28	17.56	0.89	14.98	25.10	1.10	8.95	0.46	1.54	0.06	0.02	76.93	52.12
SP-NLSD-1-9	6.26	0.00	0.00	0.04	17.71	0.32	14.58	25.64	1.15	9.03	0.08	1.78	0.00	0.02	76.60	52.25
SP-NLSD-1-20	5.82	0.00	0.01	0.14	17.92	0.34	13.50	24.05	0.97	9.17	0.33	2.45	0.02	0.02	74.72	50.46
SP-NLSD-1-12	5.93	0.00	0.36	0.73	18.04	0.80	13.24	25.01	1.11	8.73	0.14	1.74	0.01	0.04	75.87	49.96
SP-NLSD-1-6	5.57	0.06	0.56	1.04	18.13	1.00	13.97	25.24	1.19	8.63	0.15	1.61	0.09	0.02	77.26	50.81
SP-NLSD-1-21	5.36	0.00	0.01	0.14	18.27	0.44	13.89	24.63	1.22	8.25	0.25	1.72	0.00	0.04	74.22	49.95
SP-NLSD-1-26	5.83	0.00	0.09	0.11	18.42	0.42	13.56	23.60	0.92	8.73	0.27	2.48	0.00	0.01	74.45	49.56
SP-NLSD-1-39	6.35	0.00	0.00	0.11	18.54	0.96	13.39	23.70	0.89	8.13	0.21	2.42	0.04	0.03	74.79	48.75
SP-NLSD-1-3	0.00	0.00	0.41	0.79	18.60	0.74	15.36	23.46	0.65	8.65	0.21	1.57	0.02	0.03	70.49	49.90
SP-NLSD-1-3	4.01	0.00	1.28	2.10	18.68	1.15	14.20	21.08	0.90	8.00	0.18	1.88	0.00	0.05	73.52	46.25
SP-NLSD-1-1	0.00	0.00	0.14	18.68	0.51	13.21	21.78	0.55	9.18	0.57	2.29	0.00	0.05	66.95	47.57	
SP-NLSD-1-29	5.79	0.00	0.05	0.13	18.81	0.48	14.24	24.87	0.97	8.50	0.04	2.32	0.06	0.03	76.27	50.93
SP-NLSD-1-27	5.89	0.00	0.00	0.07	18.98	0.23	14.58	25.37	1.17	8.62	0.21	1.81	0.00	0.03	76.95	51.75
SP-NLSD-1-2	0.00	0.00	0.09	0.25	19.23	0.52	12.70	21.08	1.15	8.61	0.62	2.08	0.01	0.04	66.38	46.24
SP-NLSD-1-28	4.42	0.00	0.05	0.06	19.48	0.40	13.67	23.57	0.78	8.51	0.34	2.16	0.06	0.04	73.54	49.03
SP-NLSD-1-35	4.85	0.00	0.00	0.10	20.13	0.45	14.40	23.16	0.99	8.21	0.27	2.35	0.00	0.03	74.94	49.38
SP-NLSD-1-2	3.06	0.00	0.25	0.46	20.37	0.65	13.38	22.06	0.96	8.22	0.18	2.03	0.00	0.02	71.65	46.84

附表3 浅变质岩样品中化学元素分析测试结果(主量元素:wt%、微量元素: $\times 10^{-6}$)Appendix Table 3 Geochemical composition of the studied epimetamorphic rock samples (Major elements wt%; Trace elements $\times 10^{-6}$)

样品	变质砂页岩												H_{24}				
	ND-b34	ND-b5	ND-b6	ND-b7	ND-b32a	ND-b32b	SP-NLSD-2	ND-b22	ND-b31	ND-b9	SP-NLSD-1	ND-b21		ND-b2	ND-b8	ND-b33	ND-b25
SiO ₂	68.37	59.87	71.60	69.62	68.51	69.95	67.08	71.86	68.79	69.15	63.52	68.87	64.70	62.71	66.36	74.48	57.84
Al ₂ O ₃	15.38	21.58	15.16	16.59	15.53	15.26	13.99	13.66	16.11	16.33	15.30	17.14	17.06	17.67	12.77	20.76	
CaO	0.16	<0.05	<0.05	0.07	0.05	0.11	0.32	0.75	<0.05	1.64	0.07	0.15	<0.05	<0.05	1.11	0.05	
FeO	2.46	3.30	1.85	2.09	4.16	3.04	3.04	2.81	2.31	3.11	3.14	2.43	5.86	4.07	1.10	5.68	
FeO	1.07	0.48	0.57	0.50	0.59	0.26	1.06	1.02	0.81	1.78	1.6	0.55	1.24	2.05	0.68	0.78	
K ₂ O	5.09	6.97	4.76	4.78	4.63	3.15	4.22	3.02	3.59	5.5	4.63	5.51	4.16	3.97	5.19	5.69	
MgO	0.48	1.12	1.34	1.17	1.05	1.07	0.96	0.64	0.95	0.88	1.66	1.31	1.81	1.79	1.05	0.59	1.71
MnO	0.07	0.11	0.04	0.02	0.03	0.13	0.07	0.07	0.08	0.23	0.04	0.04	0.06	0.06	0.03	0.05	0.05
Na ₂ O	2.59	0.12	0.55	0.09	>0.01	0.07	3.78	0.26	3.06	0.18	1.96	1.36	0.26	0.16	0.06	1.69	0.08
P ₂ O ₅	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.07	<0.05	0.12	0.03	0.03	<0.05	0.23	0.01	0.11	0.08	<0.05	0.05	0.05
TiO ₂	0.46	0.62	0.29	0.31	0.6	0.69	0.51	0.44	0.45	0.62	0.54	0.56	0.73	0.71	0.49	0.38	0.99
CO ₂	0.15	0.18	0.09	0.18	<0.1	0.09	1.29	0.14	<0.1	0.36	0.77	0.24	1.31	0.09	0.15	<0.1	0.10
I ₂ O ⁺	2.88	5.54	3.56	3.74	3.76	3.82	1.35	3.72	3.00	4.64	2.12	2.76	4.12	5.48	1.48	5.48	
LOI	2.82	5.04	3.35	4.42	3.8	3.75	2.65	3.54	2.99	4.77	2.9	2.92	5.09	4.87	5.37	0.94	5.48
Li	23.1	31.9	27.3	24.6	150.0	142.0	20.2	22.4	69.7	71.6	26.3	27.5	82.8	71.5	55.4	26.2	52.8
Be	4.19	4.15	5.04	5.23	4.5	5.01	1.65	2.04	2.58	2.26	3.8	2.73	3.3	3.77	3.85	2.32	3.46
Cr	35.3	7.4	9.0	14.3	68.6	29.7	21.3	27.1	33.9	17.1	22.2	33.9	75.2	77.4	15.2	135.0	120.0
Mn	636	975	356	190	253	258	89.9	589	547	679	1893	266	329	569	295	290	432
Co	4.26	19.4	4.16	2.48	5.97	5.08	7.86	6.15	7.11	8.47	6.72	6.61	2	8.88	5.86	2.78	1.54
Ni	4.89	2.09	2.18	4.52	17.1	4.48	6.03	9.51	12	6.1	9.49	16.30	7.84	35.9	6.86	37.5	5.91
Cu	8.62	0.66	5.11	2.6	11.4	5.02	42.6	6.36	8.09	3.49	7.48	2.48	4.86	32.5	23.8	12	39.80
Zn	79.20	63.6	77.4	53.4	60.4	48.3	64.7	119.00	73.5	113	103	69.00	24.7	121	145	45.2	33.30
Ga	18.10	36.7	22.4	26.3	19.3	20.6	15.7	15.30	18.4	21.9	25.6	19.60	27.5	25.4	23.8	12.7	27.90
Rb	166	318	204	213	212	213	142	206	85	148	251	217	272	225	181	151	206
Sr	49.7	24.0	16.1	12.9	14.2	12.1	115	144.0	138.0	30.8	119	31.4	37.1	21.8	29.4	291.0	38.1
Mo	0.41	0.17	0.27	0.16	1.29	1.76	0.29	0.52	0.27	0.17	0.46	0.28	3.5	0.51	0.22	0.86	2.46
Cd	0.15	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.15	<0.05	0.11	<0.05	0.13	<0.05	<0.05	<0.05	0.09	0.11	<0.05
In	<0.05	0.09	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.23	<0.05	<0.05	0.06	0.12	0.06	0.08	0.09	0.07	<0.05	0.09
Cs	2.22	4	6.62	3.67	13.9	12.3	9.31	3.67	3.25	8.64	23.2	8.49	22.1	10.2	6.54	4.64	7.73
Ba	1068	2554	960	876	1396	1253	466	734	1180	972	1242	459	1406	875	966	1826	1421
Tl	0.83	1.1	0.72	0.67	0.55	0.75	0.96	0.84	0.3	0.68	1.45	0.85	1	0.88	0.54	0.42	1.08
Pb	21.50	13.6	30.8	24.7	8.54	11.3	8.84	17.00	25.7	21.1	17	21.00	27.5	11.3	24	24.6	14.00
Bi	0.11	0.06	0.27	0.26	0.23	0.16	0.79	0.16	0.11	0.35	0.24	0.36	0.12	0.18	0.08	0.33	
Th	20.10	20.1	32.4	32.2	18.8	17.6	13.5	13.90	19.4	21	27.7	17.60	14.7	15.5	20.5	13.6	16.60
U	3.51	4.14	5.13	4.84	3.35	3.09	3.19	3.45	4.19	3.45	4.1	2.19	2.59	1.85	3.56	2.75	2.22

附表 3

样品号	变质沉凝灰岩						变质砂岩						板岩					
	ND-b34	ND-b5	ND-b6	ND-b7	ND-b32a	ND-b32b	SP-NLSD-1	ND-b22	ND-b31	ND-b9	SP-NLSD-1	ND-b21	ND-b3	ND-b2	ND-b8	ND-b33	片岩 ND-b22c	
Nb	17.80	23	21.7	22.7	14.3	15.9	14.3	12.80	16.1	20.7	25.6	19.00	18.5	19.7	21	12.9	23.60	
Ta	1.24	0.46	0.69	0.74	1.25	0.41	0.94	0.93	1.35	0.5	1.79	1.28	0.45	0.42	0.44	0.84	1.59	
Zr	355	576	230	264	275	393	224	161	295	355	289	291	213	255	295	255	285	
Hf	8.86	13.1	6.89	7.63	7.71	9.47	6.19	4.56	8.5	9.25	9.32	7.90	5.68	6.39	7.3	6.9	7.68	
Sn	3.33	3.01	4.14	4.45	2.24	2.18	3.39	1.99	2.29	4.95	2.86	3.11	3.39	2.84	1.6	3.83		
Sb	0.28	0.11	0.08	0.13	0.16	0.21	0.69	0.28	0.14	0.12	1.07	0.24	0.37	0.19	0.12	0.14	0.42	
Ti	2685	4180	1958	2175	3678	4501	2958	2484	2621	4159	3259	3320	5192	4734	3433	2112	5728	
W	1.94	1.94	1.66	1.71	3.73	3.3	11.2	1.85	1.31	2.8	4.42	2.70	3.4	4.28	1.22	1.27	4.06	
As	2.43	1.62	0.68	1.01	2	4.1	2.24	2.42	1.15	1.62	2.53	1.86	3.83	46.8	2.95	1.03	2.10	
V	31.00	39	21.7	23.5	59.8	63.7	51.3	39.50	34.7	43.1	46.1	46.80	142	86.4	41.3	17.5	141.00	
La	29.10	280.00	66.20	65.10	188.00	151.00	50.6	41.50	54.20	115.00	86.3	57.60	50.30	70.20	76.70	60.40	38.90	
Ce	62.90	37.30	63.20	64.60	170.00	161.00	98.4	13.80	105.00	60.90	166	86.00	98.30	16.70	130.00	115.00	27.20	
Pr	6.08	47.00	14.80	14.10	28.50	20.60	10.6	9.15	9.26	17.90	17.4	13.20	11.30	17.70	17.70	12.80	7.85	
Nd	23.40	237.00	74.20	69.90	92.20	39.7	34.20	32.70	87.30	67.7	53.90	54.30	96.30	72.10	45.80	28.80		
Sm	4.25	25.90	10.80	8.51	14.90	10.90	5.97	7.20	5.74	10.60	10.1	8.77	7.63	11.40	10.90	8.09	5.80	
Eu	0.75	3.79	1.32	1.12	2.16	1.86	1.15	1.04	0.86	1.83	1.48	1.37	1.30	1.78	1.77	1.07		
Gd	3.39	12.00	10.30	7.21	14.10	8.04	4.46	6.84	5.27	8.34	7.67	6.79	5.59	8.50	7.93	6.55	5.41	
Tb	0.59	1.91	1.80	1.35	2.37	1.39	0.65	1.13	0.74	1.45	1.19	0.99	0.87	1.32	1.27	0.95	1.07	
Dy	3.73	10.30	11.00	8.04	12.70	7.51	4.08	6.60	3.90	8.16	7.41	5.77	5.09	7.25	7.17	5.23		
Ho	0.84	1.91	2.24	1.62	2.47	1.38	0.77	1.36	0.81	1.58	1.44	1.20	1.00	1.43	1.36	1.10	1.62	
Er	2.71	6.18	6.59	4.80	6.93	4.08	2.25	3.66	2.50	4.42	4.52	3.58	2.96	4.15	4.11	3.36	4.89	
Tm	0.45	0.91	0.98	0.72	0.95	0.61	0.35	0.54	0.36	0.62	0.72	0.58	0.45	0.62	0.59	0.49	0.71	
Yb	2.83	6.36	6.41	5.13	5.87	4.22	2.32	3.01	2.39	4.00	4.89	3.61	3.14	4.32	4.27	3.12	4.32	
Lu	0.42	0.96	0.92	0.73	0.80	0.59	0.35	0.42	0.40	0.61	0.77	0.53	0.46	0.65	0.63	0.51	0.58	
Y	20.60	51.30	69.80	50.50	67.50	35.00	21.3	36.00	19.70	44.40	39.6	34.10	29.40	43.80	41.60	26.40		
Sc	7.57	15.80	7.91	8.49	9.91	13.70	8.65	6.42	7.30	13.00	10.9	9.12	22.70	21.90	13.80	5.06	19.00	
REE	162.04	722.82	340.56	303.43	609.45	477.38	242.95	166.45	243.83	367.11	417.19	277.99	272.09	286.12	378.10	290.57	180.11	