

# 浙东南离子吸附型稀土矿床成矿规律 与找矿方向探讨

陈晨<sup>1)</sup>, 王成辉<sup>1)</sup>, 赵芝<sup>1)</sup>, 杨岳清<sup>1)</sup>, 樊锡银<sup>2)</sup>, 党晓亮<sup>2)</sup>, 张伟<sup>2)</sup>

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) 浙江省第七地质大队, 浙江丽水, 323000

**内容提要:**离子吸附型稀土矿(以下简称 iRee)主要分布于我国南岭地区,浙江省虽不在南岭五省之内,但经过浙江省地勘单位三十多年的不断探索,在浙东南地区陆续发现了数个稀土矿及多个成矿远景区,填补了浙江省该类型稀土矿的找矿空白。为探究浙东南 iRee 矿床地质特征、成矿影响因素以及稀土元素运移、赋存规律,圈定成矿远景区,本文对区内出露的花岗斑岩型 iRee,火山岩型 iRee 以及变质岩型 iRee 进行系统采样,通过岩相学、岩石地球化学等方法对各类 iRee 剖面进行对比研究。分析结果表明,荷地花岗斑岩的平均 $\Sigma\text{REE}$ 为 $271.39 \times 10^{-6}$ ,凝灰岩围岩平均 $\Sigma\text{REE}$ 为 $253.36 \times 10^{-6}$ ,大柘片麻岩 $\Sigma\text{REE}$ 约为 $517.21 \times 10^{-6}$ ,而南岭含矿岩体的平均 $\Sigma\text{REE}$ 约为 $289 \times 10^{-6}$ ,表明浙东南地区 iRee 矿床具有较好的成矿母岩条件。此外,通过对原岩中各矿物稀土元素含量的测定,查明了稀土元素主要赋存在独立的稀土矿物及少量的副矿物中,是主要的成矿物质来源;通过风化壳剖面的对比,发现稀土元素地球化学特征主要继承原岩性质,而外生作用条件使得稀土元素发生次生富集。在此工作基础上,结合前人研究成果,初步总结了区内离子吸附型稀土矿床成矿规律,并讨论下一步找矿方向。

**关键词:**离子吸附型稀土矿;浙东南;成矿规律

离子吸附型稀土矿,是指富稀土地质体在地表经历风化作用后形成黏土矿物,稀土元素从原岩中解离出来并以水合或羟基水合阳离子形式吸附在黏土矿物表面,在岩石风化壳中富集成矿(Yang Yueqing et al., 1981; Yang Zhuming, 1987; Huang Dianhao et al., 1988; He Lunyan et al., 1989; Wu Chengyu et al., 1990, 1992; Yang Xueming et al., 1992)。iRee 自 1969 年首次在我国江西省龙南县足洞发现以来,以其储量大,易开采,提取加工工艺简单,成本低等特点引起了国内外的极大重视,具有很高的工业生产价值和科学研究意义(Xia Weihua et al., 1989; Zhang Zuhai, 1990; Huo Mingyuan, 1992; Wang Denghong et al., 2013a)。随着高新技术、新兴产业的快速发展,

作为“工业味精”的稀土在各个领域,尤其是高精尖领域中的应用愈发广泛,因此对稀土产量的要求也越来越高(Wang Denghong et al., 2016, 2017; Chi Ru'an et al., 2019)。

该矿床类型发现数十年以来,取得了较大的研究成果(Wang Duzhao, 1984; Chi Ru'an et al., 1995, 1996, 2005, 2007; Liang Guoxing et al., 1997; Deng Maochun et al., 2013; Zhao Zhi et al., 2014)。但在研究初期,iRee 矿床仅见于南岭五省(江西、福建、湖南、广西、广东),前人认为该矿床类型仅分布于南岭及其周边地区;随着研究深入,不断突破了当时的研究认识,目前在高纬度、高海拔地区以及东南亚国家,也都发现了该类型矿床(Yuan Zhongxin et al., 2012; Wang Denghong et

注:本文为中国地质调查局“中国矿产地质志”项目(编号 DD20160346、DD20190379)、“大宗急缺矿产和战略性新兴产业矿产”工程“华南重点矿集区稀有稀散和稀土矿产调查项目”(编号 DD20160056)、广东省大宝山英安斑岩中铜多金属矿物综合利用研究项目(编号 HE1921)资助成果。

收稿日期:2019-10-10;改回日期:2019-12-09;网络发表日期:2019-12-14;责任编辑:周健。

作者简介:陈晨,男,1994年生。硕士研究生,矿物学、岩石学、矿床学。Email:765265981@qq.com。通讯作者:王成辉,男,1982年生。博士,副研究员,地质矿产专业。Email:wangchenghui131@sina.com。

**引用本文:**陈晨,王成辉,赵芝,杨岳清,樊锡银,党晓亮,张伟. 2020. 浙东南离子吸附型稀土矿床成矿规律与找矿方向探讨. 地质学报, 94(1):270~286, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020117.  
Chen Chen, Wang Chenghui, Zhao Zhi, Yang Yueqing, Fan Xiyin, Dang Xiaoliang, Zhang Wei. 2020. A discussion on the metallogenic regularity and prospecting direction of ion-absorption type rare earth deposits in southeastern Zhejiang Province. Acta Geologica Sinica, 94(1):270~286.

al., 2013b; Zhao Zhi et al., 2017, 2019)。相对而言,浙江稀土矿产工作程度总体偏低,新发现矿产集中分布于浙东南地区,成矿规律研究方面更是基本空白。本文以浙东南地区不同类型 iRee 矿床为研究对象,总结矿床成矿规律,进一步丰富我国 iRee 矿床的成矿理论。

## 1 浙东南离子吸附型稀土矿概况

浙江省稀土矿的勘探开发工作起步较晚,20 世纪八九十年代曾组织过全省 iRee 找矿工作和稀土概查工作,先后发现了松阳板桥、庆元荷地等矿床<sup>①</sup>,但限于开采条件及成本等问题,当时并未进行开发利用,后来由于种种问题使得全省稀土勘查工作也基本停滞不前。

为摸清家底、合理开发,浙江省地勘基金 2013 年设立了“浙江省庆元县荷地—岭头矿区稀土矿普查”项目,并提交了浙江省第一个大型规模的离子吸附型稀土矿,由此正式开启了浙江省稀土找矿的新篇章(Wang Chengliang et al., 2017)。根据浙江省地勘单位现有工作成果,浙东南地区已探明大型 iRee 矿床 1 处,中小型矿床 6 处,均为轻稀土矿。值得一提的是,浙东南地区 iRee 矿床种类分布齐全,除常见的花岗岩型 iRee(浙江庆元-荷地离子吸附型稀土矿)以外,荷地岩体周边的部分火山岩风化壳中稀土含量也达工业品位,在龙泉、遂昌地区的变质岩风化壳亦中发现变质岩型 iRee,这对该类型矿床的研究具有重要意义。除 7 处 iRee 矿床外,目前浙江省还发现独居石砂矿 3 处、磷钇矿 2 处(Wang Chengliang et al., 2017)。虽然矿床数量不多,但是浙东南地区高纬度、高海拔、多类型矿床找矿的突破,不仅打破了浙江没有稀土矿的观点,更是为南岭周边高纬度、高海拔 iRee 找矿工作提供了借鉴。

## 2 成矿背景

### 2.1 构造背景

以江山-绍兴断裂带为界,可将浙江省划分为两个截然不同的构造单元(Yu Guohua, 1995, 1996)。界线以北为浙西北地区,处于扬子准地台东南缘,发育中新元古代浅变质岩、古生代沉积岩;而界线以南为浙东南地区,处于华南褶皱系,发育元古宙中深变质岩、中生代火成岩;研究区为断裂带以南的浙东南地区。

浙东南地区与福建省毗邻,位于环太平洋构造域西侧,华夏地块武夷-云开造山系东段,江山-绍兴

断裂带以南,属华南褶皱系,构造活动较为频繁(Shu Liangshu et al., 2006)。其中,与研究区成矿关系较为密切的是燕山期构造活动(Hua Renmin et al., 2005, 2007)。这一时期,华南陆块经历了古构造应力场的转变与多次板块伸展—挤压交替演化,并伴随有岩石圈拉张—减薄,使得地幔物质上涌、地壳重熔,由此产生了大规模的岩浆活动,形成了研究区以北东(北北东)向断裂构造和火山构造的现状,并留下了空间相邻、时代相近的火山-侵入杂岩体。

### 2.2 地层

浙东南地区地层出露简单,主要是元古宇的变质基底、遍及全区的中生代火山岩系,以及零星分布的新生代地层(图 1)。

浙东南前寒武系变质基底出露范围不大,大致可分为三个独立的变质岩石单元:古元古代八都群(2.05~2.40Ga)中深变质的变粒岩、黑云母片岩,主要分布于龙泉一带,遂昌大柘、治岭头及龙游和诸暨等地也有出露;中元古代龙泉群(1.0~1.4Ga)二云变粒岩-二云石英片岩等,主要出露于龙泉,庆元一带;中—新元古代陈蔡群(0.85~1.20Ga),中深度变质的片麻岩、片岩,出露于诸暨、龙泉、岱山一带(Hu Xiongjian, 1993)。其中,出露于遂昌—大柘一带的八都群变质岩主要岩石类型为黑云(斜长)变粒岩及黑云母片麻岩,因遭受同变质期花岗质岩浆的改造而在宏观上表现为以黑云条带状混合岩类为主的混合岩系,在矿物成分、化学成分及结构构造上均呈现出花岗质片麻岩的外貌。

浙东南地处环太平洋东亚大陆边缘火山岩带,火山构造类型复杂,岩性多样,火山活动始于晚三叠世,盛于晚侏罗世,终于晚白垩世,钙碱性—高钾钙碱性火山-侵入杂岩广泛出露。不同学者根据不同因素(如岩性组合、地化特征或构造时期等),将区内火山岩系划分为不同的旋回,如 Du Yangsong et al. (1990)根据岩性组合及地化特征,将中生代火山岩系分为三个旋回:大爽组—高坞组—西山头组为第一旋回,由酸性火山岩组成, $\epsilon_{Nd} = -14.2 \sim -8.8$ ,  $T_{DM2} = 1.64 \sim 2.07\text{Ga}$ ;茶湾组—九里坪组为第二旋回,以酸性火山岩为主, $\epsilon_{Nd} = -7.8 \sim -6.5$ ,  $T_{DM2} = 1.45 \sim 1.54\text{Ga}$ ;馆头组—朝川组—塘上组—赖家组为第三旋回,发育酸性火山岩与双峰式火山岩, $\epsilon_{Nd} = -7.5 \sim -3.4$ ,  $T_{DM2} = 1.29 \sim 1.52\text{Ga}$ ,火山岩浆活动达到顶峰。Zhou Leyao et al. (1997)基于火山岩岩石组合,构造演化及年代学工作,将浙东南

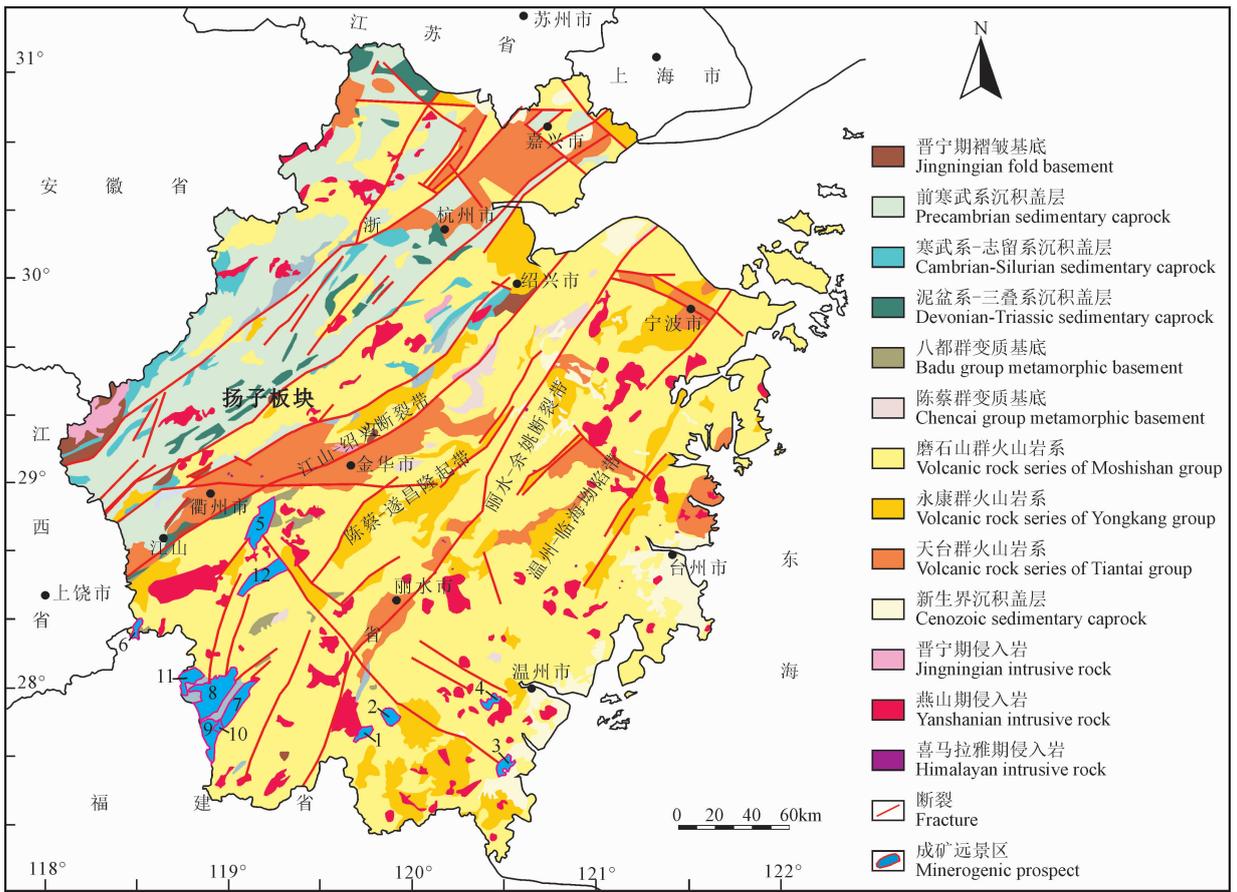


图1 浙东南地层、岩浆岩分布及成矿远景区(据浙江第七地质大队改绘)

Fig.1 Stratigraphic, magmatic rock distribution and rare earth metallogenic prospective area in southeast Zhejiang (after Zhejiang Seventh Geological Brigade)

1—龙游梧村-大阳家稀土成矿远景区;2—遂昌大柘-妙高街道稀土成矿远景区;3—江山枫岭头-东坑口稀土成矿远景区;4—龙泉宝溪-溪源田稀土成矿远景区;5—龙泉八都周边稀土成矿远景区;6—庆元黄田-龙泉小梅稀土成矿远景区;7—庆元太湖稀土成矿远景区;8—龙泉吴公稀土成矿远景区;9—景宁东坑-周湖岭稀土成矿远景区;10—文成枫树亭-吴垟稀土成矿远景区;11—阳县草池-黄山村稀土成矿远景区;12—瑞安吴源-双界田稀土成矿远景区

1—Longyou Wucun-Dayangjia rare earth mineralization prospect; 2—Suichang Dazhe-Miaogao Road rare earth mineralization prospect; 3—Jiangshan Fenglingtou-Dongkengkou rare earth mineralization prospect; 4—Longquan Baoxi-Xiyuantian rare earth mineralization prospect; 5—Longquan Badu rare earth mineralization prospect; 6—Qingyuan Huangtian-Longquan Xiaomei rare earth mineralization prospect; 7—Qingyuan Taihu rare earth mineralization prospect; 8—Longquan Wugong rare earth mineralization prospect; 9—Jingning Dongkeng-Zhouhuling rare earth mineralization prospect; 10—Wencheng Fengshuting-Wuao rare earth mineralization prospect; 11—Yangxian Caochi-Huanshan village rare earth mineralization prospect; 12—Ruian Wuyuan-Shuangjiectian rare earth mineralization prospect

中生代火山岩浆活动分为四个旋回:第一旋回为毛弄组—大爽组—高坞组,在挤压后松弛的构造环境下形成,由钙碱性系列的英安质火山碎屑岩和高钾钙碱性系列的安山岩-英安岩-流纹岩组成;第二旋回为西山头组—茶湾组—九里坪组,与第一旋回构造环境相同,主要由(玄武岩)-安山岩-英安岩-流纹岩组成的高钾钙碱性系列;第三旋回为馆头组—朝川组的碱性玄武(安玄岩)-高钾流纹岩组成的不连续双峰式系列,处于弱拉张构造环境;第四旋回为塘上组—赖家组的安山岩-英安岩-流纹岩组成的连续

高钾钙碱性系列。

### 2.3 岩浆岩

区内侵入岩较发育,但岩体大小悬殊,多为中小岩株,仅个别超过 100km<sup>2</sup>(图 1)。侵入岩时代较为齐全,自老至新依次有晋宁期、加里东期、印支期、燕山期和喜马拉雅期岩体(Hua Renmin et al., 2005, 2007; Hua Renmin, 2005)。受中生代强烈的构造事件及岩浆活动影响,燕山期侵入岩占浙东南侵入岩的绝大比例,荷地岩体就是区内燕山期早白垩世的代表性岩体之一。

## 2.4 气候及地理

表生风化作用对 iRee 矿床的形成具有重要的影响。目前认为该类型矿床大多形成于气候温暖潮湿、海拔低于 200m 的低山丘陵区,这种环境利于成矿母岩风化,便于黏土矿物形成以及稀土元素从矿物中的解离,使得稀土元素在后期能够次生富集成矿。

研究区以山地丘陵为主,其次为冲积平原。地势自西南至东北阶梯状倾斜,西南多山地,海拔较高(庆元花岗岩型 iRee);中部多丘陵(遂昌-大柘变质岩型 iRee);东部多为冲积平原(易形成砂矿床)。区内河流众多,湖泊广布,水网密集。

浙东南地区位于我国东南沿海,属亚热带季风气候,湿热多雨,风化作用强烈,因此风化壳往往较为厚大,成矿潜力较大。但是,浙东南相比于南岭五省,纬度较高、部分地区海拔较高等地理因素也制约了该区 iRee 矿床的形成。笔者认为,邻近海域这一地理位置条件及其所产生的气候、温差等因素,弥补了纬度及海拔的限制,使得在浙东南区域也能成矿。如,荷地稀土矿平均海拔 1000m,打破了传统观念的认识,为高海拔找矿提供模板;遂昌-大柘成矿远景区纬度为 28.6°N,打破了 27.0°N 的纬度制约认识,为高纬度找矿提供借鉴。

## 3 稀土矿地质特征

Chi Ru'an et al. (2012)按照离子吸附型稀土矿与原生稀土矿床的关系及稀土元素的配分特点,曾将 iRee 矿床分为深成岩风化壳、浅成岩风化壳、喷出岩风化壳三大类,并细化为 11 种。根据目前浙江省找矿成果,按母岩类型不同,可将浙东南地区 iREE 型稀土矿划分为花岗岩风化壳型、变质岩风化壳型、火山岩风化壳型三种。其中以花岗岩风化壳型为主,变质岩风化壳型也有较大潜力。

### 3.1 花岗岩风化壳型 iRee

#### 3.1.1 成矿母岩

浙东南侵入岩在全区星罗棋布,种类齐全,超基性、基性岩至酸性、碱性岩均有出露,其中以酸性、中酸性岩体为主;岩体时代跨度大,前寒武纪、印支期、燕山期以及喜马拉雅期均有分布,以燕山期岩体最为广布。区内岩体时代集中在两个区间:① 江山-绍兴断裂带以东、宁波-温州以西的侵入岩中带,成岩时间在 102~135Ma 之间;② 宁波-温州以东的沿海地区(侵入岩东带),成岩时间在 71~74Ma 之间(Gao Yanjun et al., 1986; Wang Chengliang et

al., 2017)。反映区内经历了两次大的构造历史事件,形成如今的侵入岩分布格局(Yang Wencai, 2018; Xu Keqin et al., 1984)。第一次是在早白垩世中期,古构造应力场转变为 NW-SE 向伸展,导致地壳裂陷形成大规模断陷盆地,并引起巨量的岩浆侵位和火山喷发;第二次是在晚白垩世末期,新特提斯构造域板片俯冲、后撤,古构造应力场再次转变为 N-S 向伸展,形成大量侵入岩体。

区内燕山晚期中酸性侵入岩成矿潜力较大,成矿母岩以黑云母二长花岗斑岩、黑云母花岗岩为主,其次还有部分黑云钾长花岗岩、角闪花岗斑岩、正长斑岩。

#### 3.1.2 实例——荷地花岗岩型 iRee 稀土矿

荷地岩体位于浙江省西南部,邻近浙闽交界处,受北东-北北东向区域断裂影响,荷地岩体大体沿北东向展布,主要岩性为黑云二长花岗斑岩,成岩时间为 135Ma,属燕山晚期早白垩世岩体(图 2), $\epsilon_{\text{HF}}(t) = -15.21 \sim -8.84$ ,岩浆源于古老地壳物质熔融。荷地 iRee 矿床是浙江省第一个大型离子吸附型稀土矿。

荷地黑云二长花岗斑岩高硅富钾, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 8.40\% \sim 9.22\%$ , $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  为 1.211~1.337(表 1),A/CNK 范围 1.109~1.146,为过铝质系列;赖特碱度率(A.R.)3.36~4.22,里特曼指数  $\sigma < 3.3$ ,为钙碱性岩;分异指数(DI)88.99%~92.46%,固结指数(SI)2.51~6.43,表明岩浆分离结晶作用较强,岩浆分异程度较强。

矿床风化壳在垂向上均具有一定的分带变化,根据岩体风化程度差异,自上而下依次为残坡积层(腐殖层)、全风化层、半风化层、基岩底板。每个层位黏土矿物组合不同,稀土含量也有明显差异:含矿主体一般在厚度较大的全风化层,其次为坡残积层、半风化层,到基岩面则不成矿,稀土资源量为零(He Lunyan et al., 1989; Huo Mingyuan, 1992)。

花岗斑岩风化壳残坡积层一般 0~2.0m,土黄—砖红色,主要由黏土矿物(约 60%~80%)组成,其次为长石风化残骸、残存石英颗粒,少量表层浮土及植物根系。该层黏性强、渗透性差,稀土含量多在边界品位以下。全风化层一般较为厚大(约 8~20m),灰白—肉红色,与上层多为渐变过渡,风化程度最高,原岩结构构造均被破坏,花岗结构变为砂质黏土结构,该层结构松散,渗透性强,是主要赋矿层位,某中段稀土含量达工业品位,而后向下品位逐渐降低。半风化层风化程度稍弱,与上层渐变过渡,

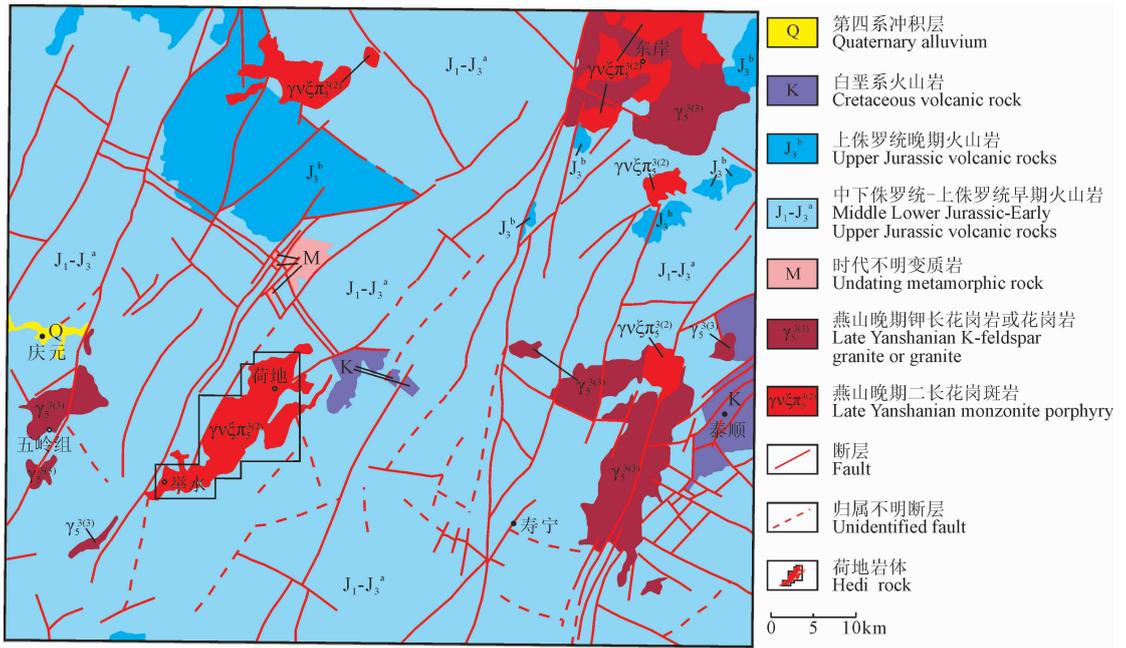


图2 浙江荷地稀土矿区地质简图(据1/20万泰顺幅地质图简化改绘)

Fig.2 Sketch geologic map of the rare earth ore mining area in Hedi, Zhejiang (simplified redrawing based on 1/200000 Taishun geological map)

厚度一般1~10m,部分较硬团块状风化物中依稀可辨花岗斑岩的组构;该层位中,黏土矿物含量锐减至15%~25%,稀土品位降至边界品位以下,含量略高于基岩,浸取率亦锐减。微风化层难以使用赣南钻施工取样,平均厚度2~5m,矿物极少产生风化,黏土矿物含量最少,稀土含量与基岩含量相当。

为探究稀土元素在风化壳垂向分带上的变化,我们选取浙东南 iRee 矿床的数个剖面进行采样分析,采样情况见表2;各剖面作微量元素蛛网图(图3),以该剖面的基岩为标准制得稀土配分模式图(图4),各原岩对比制得微量元素蛛网图及稀土配分模

式图(图5)。

微量元素蛛网图表现出谷峰迭起的曲线形式(图5a),普遍高 Rb、Th、U、Zr、Hf、La 及 Ce,低 Ba、Nb、Ta、Sr 和 Ti,可能是岩浆经历了强烈的分离结晶作用;当原岩发生风化后,除稀土元素富集外, Nb、Ta、Zr、Hf、Ba、Ti 也会存在微弱富集,而 Sr 则会发生强烈亏损(图3)。

根据图4可知,对于花岗岩型 iRee,随着深度增加,风化程度增加,稀土元素(除 Ce)呈逐渐富集的趋势,且随着深度的增加,轻稀土富集的趋势强于重稀土,风化壳富集的稀土高于原岩1~3倍。各层基

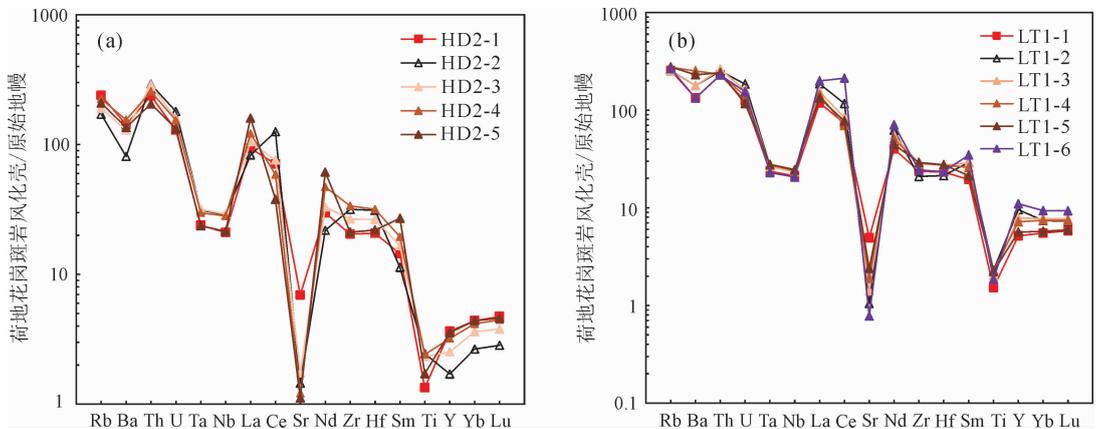


图3 浙江荷地花岗斑岩剖面不同层位微量元素蛛网图

Fig.3 Trace element spider diagram of different horizons in granite porphyry profile in Hedi, Zhejiang

表 1 浙东南部分地质体主量(%)、微量及稀土元素( $\times 10^{-6}$ )化学特征Table 1 Chemical characteristics of major (%), trace and rare earth elements ( $\times 10^{-6}$ ) in some geological bodies in Southeast Zhejiang

样号	HD2-1	LT1-1	QZ1019-基岩	DZ-1-4	DZ-2-1	LT2-4	LT4-4	HD1-2
	荷地岩体		遂昌变质岩			荷地岩体围岩		
岩性	花岗斑岩	花岗斑岩	片麻岩	片麻岩	片麻岩	凝灰岩	凝灰岩	凝灰岩
SiO <sub>2</sub>	72.03	72.52	59.61	62.75	65.67	73.87	78.49	72.67
TiO <sub>2</sub>	0.32	0.30	2.02	1.16	1.12	0.25	0.13	0.25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.51	14.56	15.10	15.13	12.66	12.91	12.02	13.29
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.23	1.29	1.60	0.92	0.67	1.50	1.02	0.67
FeO	0.97	0.69	7.21	6.60	5.47	0.68	0.53	1.31
MnO	0.12	0.06	0.14	0.12	0.08	0.11	0.09	0.11
MgO	0.38	0.28	1.93	0.63	0.78	0.22	0.25	0.32
CaO	0.44	0.27	5.53	4.67	3.02	1.27	0.34	1.46
Na <sub>2</sub> O	4.09	3.83	2.43	2.31	1.84	3.01	1.41	3.12
K <sub>2</sub> O	5.13	5.12	3.08	4.07	5.26	4.39	4.34	4.88
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.06	0.03	0.40	0.41	0.28	0.05	0.01	0.04
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0.96	1.24	0.92	0.82	2.12	1.24	1.68	1.04
Li	17.30	7.79	25.80	10.70	23.90	21.60	16.00	21.10
Be	2.34	2.81	4.18	3.68	3.22	2.70	3.60	2.70
Cr	9.15	8.89	77.60	13.70	22.40	11.80	9.23	20.40
Mn	867.00	413.00	1197.00	930.00	639.00	817.00	649.00	808.00
Co	2.03	1.75	18.40	8.17	8.14	1.74	1.25	1.89
Ni	1.15	1.06	12.80	3.85	3.31	3.53	1.65	2.04
Cu	3.10	2.56	15.00	13.10	11.10	3.00	2.27	5.58
Zn	60.40	34.80	150.00	140.00	128.00	73.10	57.40	63.20
Ga	17.40	16.80	27.80	28.70	25.20	16.20	17.00	17.50
Rb	152.00	162.00	131.00	137.00	235.00	165.00	202.00	167.00
Sr	146.00	104.00	273.00	254.00	187.00	73.40	85.90	127.00
Mo	0.56	0.44	1.11	0.93	1.13	0.60	0.23	0.58
Cd	0.07	0.10	0.18	0.23	0.18	0.06	<0.05	0.21
In	0.05	<0.05	0.12	0.15	0.15	0.07	0.07	0.05
Cs	2.20	2.87	3.01	1.10	2.20	14.30	6.50	3.43
Ba	997.00	931.00	1135.00	1366.00	939.00	512.00	366.00	1042.00
Tl	0.81	0.65	0.66	0.67	1.18	0.82	0.97	1.07
Pb	23.90	19.10	27.80	35.90	49.00	17.00	21.00	28.40
Bi	0.07	0.38	0.10	0.10	0.15	<0.05	0.17	0.25
Th	20.20	19.50	11.10	13.40	37.80	14.60	25.60	16.30
U	2.71	2.62	1.54	2.10	4.88	2.58	3.56	2.63
Nb	15.00	15.10	35.10	39.00	35.60	13.50	22.30	14.50
Ta	0.98	0.97	2.25	2.47	2.55	0.96	1.47	0.99
Zr	229.00	265.00	437.00	539.00	703.00	221.00	166.00	172.00
Hf	6.41	7.18	10.80	13.80	19.20	6.14	5.61	5.20
Sn	1.82	1.15	1.50	1.56	4.03	1.67	2.78	2.24
Sb	0.08	0.12	0.18	0.12	0.18	1.92	0.21	0.27
Ti	1737.00	1968.00	12228.00	6920.00	6481.00	1447.00	726.00	1518.00
W	0.35	0.73	1.79	0.40	0.42	1.30	0.55	0.87
As	0.22	0.70	3.43	0.51	2.78	1.51	1.18	1.26
V	8.19	9.12	68.10	12.30	18.80	8.79	5.07	11.60
La	64.30	81.60	86.00	106.00	126.00	58.10	60.50	69.00
Ce	126.00	130.00	171.00	204.00	255.00	109.00	96.20	120.00
Pr	11.90	15.90	19.60	24.40	29.90	11.50	12.40	12.70
Nd	40.30	54.40	78.10	101.00	117.00	41.10	43.90	41.80
Sm	6.39	8.67	15.40	19.50	22.60	7.17	7.96	7.40
Eu	0.94	1.25	2.54	3.15	2.17	0.88	0.47	1.12
Gd	4.60	5.96	13.50	18.60	20.60	5.77	6.43	6.06
Tb	0.65	0.86	1.91	2.68	3.09	0.84	0.93	0.85
Dy	3.69	4.91	11.00	16.00	18.10	4.90	5.59	4.83
Ho	0.70	0.96	2.11	3.11	3.55	0.98	1.11	0.92
Er	2.09	2.80	5.88	8.91	10.00	2.87	3.18	2.51
Tm	0.31	0.41	0.81	1.25	1.43	0.44	0.48	0.36
Yb	2.17	2.72	5.16	8.10	9.11	2.87	3.26	2.39
Lu	0.35	0.43	0.79	1.20	1.37	0.44	0.49	0.37
Sc	4.94	5.02	24.30	18.40	15.70	5.74	4.51	4.19
Y	16.60	23.50	58.60	84.90	98.80	25.20	29.20	25.70

表 2 浙东南稀土风化壳剖面采样情况

Table 2 Sampling of rare earth weathering crust in southeast Zhejiang Province

花岗岩型 iRee:											
样号	HD2-1	HD2-2	HD2-3	HD2-4	HD2-5	LT1-1	LT1-2	LT1-3	LT1-4	LT1-5	LT1-6
深度	基岩	2.0m	3.0m	4.0m	5.0m	基岩	3.0m	4.0m	5.0m	6.0m	7.0m
凝灰岩型 iRee:											
样号	LT2-1	LT2-2	LT2-3	LT2-4		LT4-1	LT4-2	LT4-3	LT4-4		
深度	1.5m	2.5m	3.5m	基岩		1.0m	2.0m	3.0m	基岩		
凝灰岩型 iRee:											
样号	QZ1019-H1		QZ1019-H1		QZ1019-H1		QZ1019-风化壳		QZ1019-基岩		
深度	1.0m		2.5m		4m		5.5m		基岩		

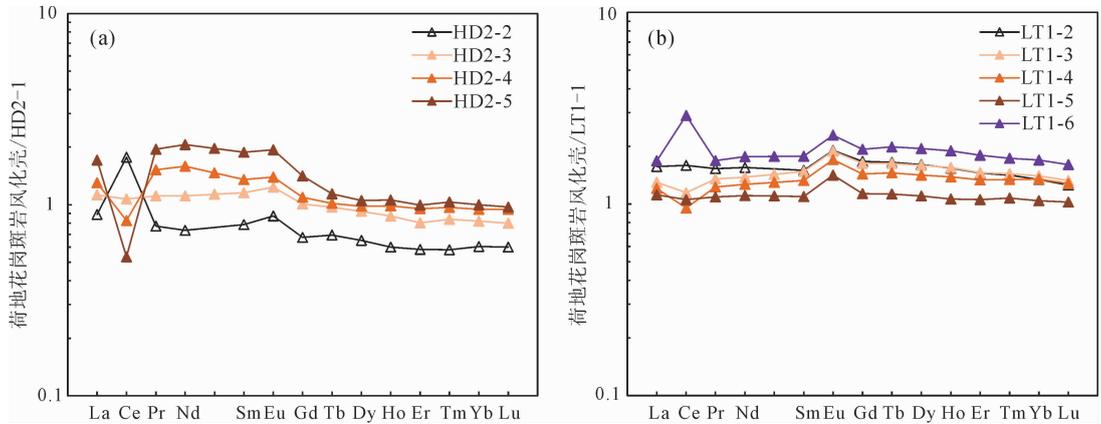


图 4 浙江荷地花岗斑岩风化壳剖面不同深度相对于基岩的稀土配分模式图

Fig. 4 Rare-earth distribution patterns of different depths of weathering crust relative to bedrock in Hedi, Zhejiang

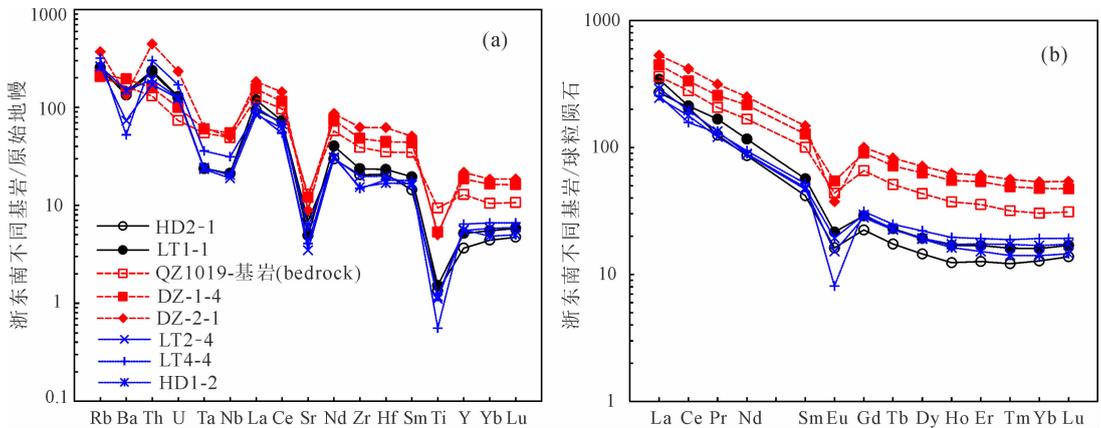


图 5 浙东南各原岩的微量元素蛛网图(a)及稀土元素配分模式图(b)

Fig. 5 Trace element spider diagram (a) and REE patterns (b) of each protolith in Southeast Zhejiang

HD2-1、LT1-1—荷地岩体(花岗斑岩);QZ1019(基岩)、DZ-1-4、DZ-2-1—大柘片麻岩;LT2-4、LT4-4、HD1-2—荷地岩体围岩(凝灰岩)

HD2-1, LT1-1—Hedi rock (granite porphyry); QZ1019 (bedrock), DZ-1-4, DZ-2-1—Dazhe gneiss;

LT2-4, LT4-4, HD1-2—surrounding rock of Hedi (tuff)

本继承了原岩(上一层位)稀土元素的配分模式。表明表生作用条件对稀土配分的影响弱于原岩的影响(除个别变价元素以外);但是 Ce 受表生作用条件影响较大,基本改变了原岩的配分,可能出现 Ce 的正异常或负异常。

黑云二长花岗斑岩的  $\Sigma REE = 264.39 \times 10^{-6}$

$\sim 310.87 \times 10^{-6}$ ,  $LREE/HREE = 4.41 \sim 17.16$ ,  $La_N/Yb_N = 21.25 \sim 21.52$ ,轻重稀土分异明显,轻稀土强烈富集,稀土配分模式为轻稀土富集,重稀土相对亏损的右倾型,图像左陡右缓(图 5); $\delta Eu \approx 0.50$ ,存在 Eu 的负异常, $\delta Ce = 0.83 \sim 1.04$ ,铈异常不明显。

### 3.1.3 稀土元素赋存状态

对成矿母岩来讲,前人认为稀土矿物(或副矿物)在全岩中比例很少而不能作为稀土的主要来源(Li Wen, 1995);但后来实验证明虽然稀土矿物数量很少,但其稀土含量很高,加权后仍然能够作为稀土元素的主要来源(如西华山岩体、足洞岩体等)(Wu Chengyu et al., 1992; Yang Xueming et al., 1992)。

但是不同矿区存在差异,需实验详细论证。为探究浙东南稀土元素主要来源于造岩矿物、副矿物还是独立稀土矿物,我们对区内出露的稀土矿区(远景区)成矿母岩进行采样分析,显微镜下目估单矿物含量,LA-ICP-MS 及电子探针分析单矿物中稀土元素含量,最后进行加权平均,计算得出原岩中各矿物的稀土加权比重。

电子探针在中国地质科学院矿产资源研究所完成,操作流程及实验条件见 Hou Jianglong et al. (2017)。LA-ICP-MS 在国家地质实验测试中心完成,操作流程及实验条件见 Hu Peng et al. (2014)。此次实验分析了各类岩体共 193 个点位,处理后结果见表 3。

表 3 浙东南三种成矿母岩中各矿物的稀土贡献率

Table 3 Rare earth contribution rates of minerals in three ore-forming parent rocks in Southeast Zhejiang

矿物	花岗斑岩		片麻岩		凝灰岩	
	稀土含量 ( $\times 10^{-6}$ )	贡献率 (%)	稀土含量 ( $\times 10^{-6}$ )	贡献率 (%)	稀土含量 ( $\times 10^{-6}$ )	贡献率 (%)
石英	16.00	0.16	32.93	0.28	13.75	0.054
斜长石	77.62	0.38	26.04	0.22	17.07	0.11
钾长石	49.21	0.35	8.90	0.06	15.93	0.10
微斜长石	69.38	0.34	-	-	18.13	0.028
钠长石	-	-	27.19	0.06	-	-
黑云母	1413.44	3.70	29.34	0.10	407.80	1.27
绿泥石	-	-	39.93	0.03	-	-
普通辉石	-	-	647.28	1.39	-	-
易变辉石	-	-	136.71	0.95	-	-
石榴子石	-	-	612.85	2.64	-	-
榍石	-	-	10234.60	4.41	892.93	0.70
锆石	-	-	1311.27	0.28	-	-
黄铁矿	-	-	0.62	0.00	-	-
钛铁矿	1298.89	1.27	34.62	0.06	-	-
磷灰石	-	-	1639.80	0.35	-	-
金红石	-	-	2598.28	0.56	-	-
火山灰	-	-	-	-	41.46	1.94
稀土矿物	287031.67	93.80	207124.51	89.25	245350.63	95.80

花岗斑岩中造岩矿物约占 90%,其稀土贡献率却仅占 4.93%;副矿物约占 3%,其稀土贡献率占 1.27%;稀土矿物仅占全岩 1%左右,而稀土贡献率

却高达 93.80%(表 3)。由此可知,对荷地花岗岩型 iRee 稀土矿区来讲,独立稀土矿物(图 6)才是其主要成矿物质来源。在花岗斑岩中见有独居石、氟碳铈矿、氟碳钙铈矿等稀土矿物及含量较多的榍石、磷灰石等副矿物,而氟碳铈矿、氟碳钙铈矿等抗风化能力较弱,一般是主要的成矿物质来源。因为虽然稀土矿物在全岩占比很少,但其稀土元素含量往往高出造岩矿物稀土含量的四至五个数量级,因此加权之后仍然占最高比重。

稀土浸取实验表明,相比于凝灰岩与片麻岩全风化层,花岗岩全风化层的稀土浸取率最高,平均 51.60%,其中矿体部分(TREO>0.08%)的样品,平均浸取率 64.60%。在 15 种稀土元素中,重稀土浸取率略高于轻稀土,CeO<sub>2</sub> 浸取率最低,平均值不到 12%,La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub>、Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 浸取率平均可达 70%以上。

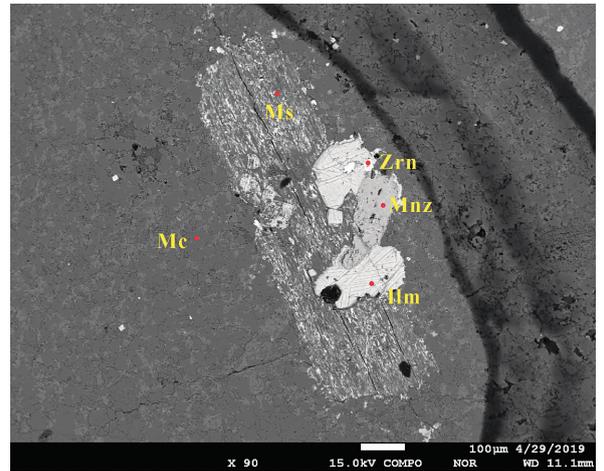


图 6 荷地花岗斑岩中的稀土矿物

Fig. 6 Rare earth minerals in Hedi granite porphyry  
Mc—微斜长石;Ms—白云母;Zrn—锆石;Mnz—独居石;Ilm—钛铁矿  
Mc—Microcline;Ms—muscovite;Zrn—zircon;  
Mnz—monazite;Ilm—ilmenite

## 3.2 火山岩风化壳型 iRee

### 3.2.1 成矿母岩

浙东南地区中生代火山岩广泛发育。晚侏罗世受太平洋板块挤压,火山活动强烈,浙东南地区形成了巨厚的陆相火山岩,夹火山间歇期的火山碎屑沉积及正常沉积岩。其中以陆相流纹质熔岩、熔结凝灰岩、凝灰岩等酸性火山岩为主,次有少量英安质熔岩等中酸性火山岩。这些火山岩系构成了大部分的 iRee 矿床围岩,而与该火山岩系同期的酸性岩体则构成了花岗岩型 iRee 的成矿母岩。成矿母岩岩性主要是晶屑凝灰岩、晶玻屑凝灰岩、熔结凝灰岩等中

酸性火山碎屑岩类。

### 3.2.2 实例——庆元火山岩型 iRee 矿化点

以庆元凝灰岩(荷地岩体围岩)为例,探讨火山岩型 iRee 矿床特征。庆元火山岩为荷地岩体围岩,岩性主要为晶屑凝灰岩,属侏罗系西山头组,下伏高坞组流纹质晶屑熔结凝灰岩,少量出露,上覆九里坪组流纹岩。浙江省地质调查院 Rb-Sr 定年结果显示西山头组年龄为  $137 \pm 2\text{Ma}$ ,判断与荷地岩体为同期的火山-侵入杂岩体。

西山头组晶屑凝灰岩  $\text{SiO}_2$  含量较高,范围为  $72.67\% \sim 78.49\%$ ,为弱过铝质至过铝质系列; $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  含量为  $5.75\% \sim 8.00\%$ , $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  为  $1.458 \sim 3.078$ , $A/\text{CNK}$  为  $1.017 \sim 1.574$ ,赖特碱度率(A.R.) $2.74 \sim 3.37$ ,里特曼指数  $\sigma < 3.3$ ,为钙碱性岩;分异指数(DI) $88.95\% \sim 91.17\%$ ,固结指数(SI) $2.25 \sim 3.32$ ,表明岩浆分离结晶作用也较强,岩浆分异程度较强(表1)。

由于庆元凝灰岩与荷地花岗斑岩为同期火山-侵入杂岩体,其微量及稀土元素地球化学特征与荷地岩体极为相似。凝灰岩的微量元素也表现出谷峰迭起的形式(图5a),高 Rb、Th、U、Zr、Hf、La 及 Ce,低 Ba、Nb、Ta、Sr 和 Ti。从原岩到风化壳,微量元素的表现与花岗岩型 iRee 略有不同,其 Nb、Ta 流失, Ti 强烈流失;而 Zr、Hf 等元素流失或亏损均存在。LREE 表现为富集, HREE 则有富集有亏损(图7)。

凝灰岩中  $\sum \text{REE} = 242.90 \times 10^{-6} \sim 270.31 \times 10^{-6}$ ,  $\text{LREE}/\text{HREE} = 10.31 \sim 13.78$ ,  $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 13.31 \sim 20.71$ ,轻重稀土分异明显(但弱于荷地花岗斑岩),轻稀土富集,稀土配分模式为右倾型,与荷地岩体基本一致(图5b); $\delta\text{Eu} = 0.19 \sim 0.50$ ,存在 Eu

的强负异常, $\delta\text{Ce} = 0.81 \sim 0.97$ ,表明存在微弱的铈负异常或铈异常不明显。

荷地围岩为晶屑凝灰岩,常见灰白色、灰绿色及紫红色,主要由火山灰构成,可见石英、长石晶屑,含量较低。致密,块状构造,风化后似土状。野外观察到的晶屑凝灰岩剖面发育程度次于花岗斑岩剖面,厚度往往仅为  $5 \sim 15\text{m}$ ,风化程度较差。残坡积层平均  $0 \sim 2\text{m}$ ,灰黑色—红褐色,黏土矿物为主,占  $70\% \sim 80\%$ ,其次为生物残骸、植物根系及表层浮土,很少见有矿物碎屑,该层稀土含量较低,一般均在边界品位以下,但向下含量逐渐增高。全风化层随原岩颜色不同而略显差异,一般  $5 \sim 10\text{m}$ ,风化彻底,砂质感较强,致密但不成团块,该层渗透性强,黏土矿物含量最高,是主要的赋矿层位,部分中段可达工业品位。半风化层与上一层位渐变过渡,偶有团块,难辨矿物。

根据风化壳剖面配分模式图(图8)可知,对于火山岩型 iRee,随着深度增加,风化程度增加,稀土元素大多呈富集趋势;由于 Ce、Eu 是变价元素,在地球化学作用过程中与其他稀土元素发生分离:在一定外界环境下, $\text{Ce}^{4+}$  形成方铈石,造成 Ce 亏损;而长石易风化,解离出的 Eu 迁移至风化壳中,出现 Eu 的强烈富集。相比于原岩,风化壳中稀土富集  $1 \sim 4$  倍,个别元素富集 10 倍。稀土配分形式基本也继承了原岩的配分模式,受表生作用影响较小(除 Ce、Eu 外)。

### 3.2.3 稀土元素赋存状态

在庆元晶屑凝灰岩中观察到的矿物种类较少,火山灰占绝大比例,但其稀土元素含量很低,平均  $22.98 \times 10^{-6}$ 。据表3,造岩矿物占全岩的  $27\%$  左右,稀土贡献率约为  $1.56\%$ ;副矿物及火山灰占全

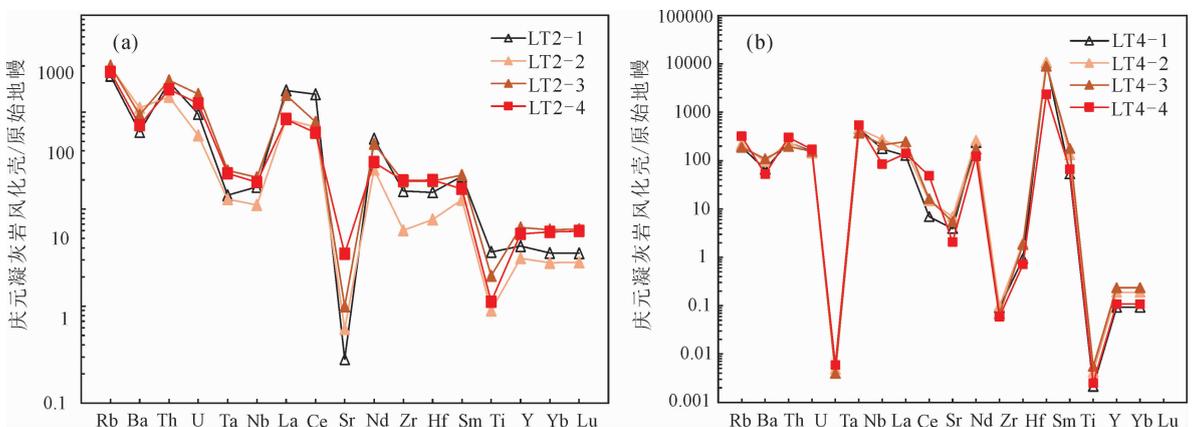


图7 浙江庆元凝灰岩剖面不同层位微量元素蛛网图

Fig. 7 Trace element spider diagram of different horizons in tuff section of Qingyuan, Zhejiang Province

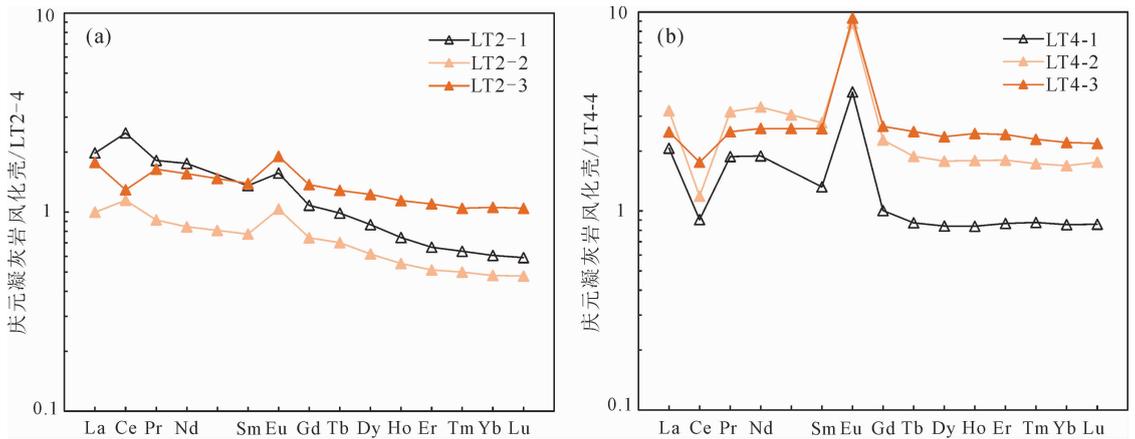


图 8 浙江庆元凝灰岩风化壳剖面不同深度相对于基岩的稀土配分模式图

Fig. 8 Rare-earth distribution patterns of different depths of weathering crust relative to bedrock in Qingyuan, Zhejiang Province

岩的 60%，贡献率则仅为 1.64%；独立稀土矿物以不到 1% 的比例贡献了 95.80% 的成矿物质。

凝灰岩全风化层的稀土浸取率差别较大，最高可达 70%，甚至略高于花岗斑岩全风化层，但是浸取率最低仅能达到 25%。推测可能是由于风化程度的差异以及雨水淋滤的原因，使得部分稀土元素流失，降低了全风化层的浸取率。

### 3.3 变质岩风化壳型 iRee

#### 3.3.1 成矿母岩

浙东南区变质岩出露范围不大，主要分布于江绍断裂带南侧龙泉、龙游、诸暨地区以及西南部遂昌大柘、洽岭头地区，以古元古代八都群和中一新元古代陈蔡群变质岩为主，其次为零星分布于龙泉、景宁、青田的中元古代龙泉群。

古元古代八都群是浙东南最古老的地层，是一套经历了角闪岩相变质作用和不同程度的花岗质混合岩化作用的区域变质岩，主要由变粒岩、黑云母片岩及片麻岩构成。

中元古代龙泉群是一套经历了高绿片岩相变质作用形成的区域变质岩，主要由二云变粒岩、二云石英片岩、二云片岩及少量绿帘斜长角闪岩、含铁石英岩等构成。

中一新元古代陈蔡群是经历了多期次区域动力-热流变质的区域变质岩系，主要岩性有角闪岩类、变粒岩类、片麻岩类、大理岩类。变粒岩是陈蔡群的主体岩性，少量片麻岩类。

目前，通过赣南钻对部分变质岩区进行取样分析，结果显示具有成矿潜力的风化壳母岩以片麻岩为主、其次为片岩，而浙东南分布较广的变粒岩成矿性则较差。

#### 3.3.2 实例——大柘变质岩型 iRee 矿化点

以遂昌-大柘片麻岩为例，探究变质岩型 iRee 稀土矿成矿母岩及风化壳特征。遂昌-大柘变质岩带位于丽水-余姚断裂带西部，岩性以含榴黑云母片麻岩为主，少量变粒岩、浅粒岩，属古元古代八都群。

大柘地区含榴黑云母片麻岩中，SiO<sub>2</sub> 范围为 59.61%~65.67%，K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O 含量为 5.51%~7.10%，K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 为 1.267~2.859，低锰(MnO=0.08%~0.14%)，低镁(MgO=0.63%~1.93%)，与荷地花岗斑岩相比，大柘片麻岩低 Si，高 Fe、Mn、Mg 等金属元素(表 1)。

片麻岩的微量元素含量普遍高于荷地花岗斑岩及凝灰岩，Th、U 含量偏低，其他元素则呈现相似特征(图 5a)。风化壳各层位相对于片麻岩变化不大，Sr、Ti 亏损较多，Nb、Ta、Zr、Hf 略亏损(图 9a)。

片麻岩  $\Sigma$  REE = 413.80 × 10<sup>-6</sup> ~ 619.32 × 10<sup>-6</sup>，LREE/HREE=7.65~9.05，La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub>=9.39~11.95，轻重稀土分异明显(但弱于荷地花岗斑岩)，轻稀土富集，稀土配分模式为轻稀土富集，重稀土相对亏损的右倾型，图像左陡右缓(图 5b)； $\delta$ Eu=0.3~0.53，存在 Eu 的负异常， $\delta$ Ce=0.95~0.98，表明铈异常不明显。

片麻岩风化壳在野外容易辨别，在风化程度最高的全风化层依然可见原岩的片麻状构造，其风化程度普遍强于花岗斑岩及凝灰岩风化壳，各层位厚度纵深较长，残坡积层、全风化层及半风化层厚度普遍达 20 余米，但其稀土元素含量变化却最小。

根据图 9b 可知，对于变质岩型 iRee，随着深度增加，风化程度增加，稀土元素富集趋势不甚明显，可能有两点原因造成：第一，可能是由于样品偶然

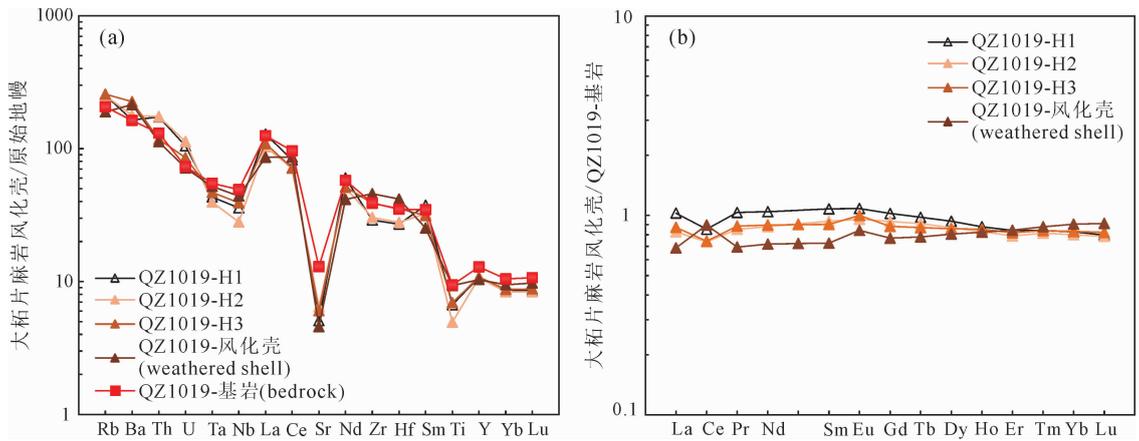


图9 遂昌片麻岩剖面不同层位风化壳微量元素蛛网图(a)及各层相对基岩的稀土配分模式图(b)

Fig. 9 The trace element spider diagram (a) of weathering crust at different levels of Suichang gneiss section and REE distribution pattern of each layer relative to bedrock (b)

性;第二,片麻岩所具有的片麻状构造,限制了稀土元素在溶液中的流动、富集。即便如此,我们仍然可以看出,风化壳的稀土配分主要还是受原岩影响。

### 3.3.3 稀土元素赋存状态

在三种 iRee 稀土矿中,花岗岩型和火山岩型的稀土富集系数要高于变质岩型,但是变质岩(片麻岩)中的矿物种类丰富,含大量石榴子石、辉石、榍石、磷灰石等矿物及稀土矿物(图 10)。在造岩矿物及大多副矿物中,稀土元素以类质同象形式存在;在稀土矿物中,稀土元素则以独立的矿物相形式存在。

据表 3,片麻岩中造岩矿物约占全岩的 90%,其稀土贡献率则为 5.09%;副矿物占全岩的 8%,稀土贡献率为 5.67%;而独立的稀土矿物虽然仅占全岩的 1%左右,但稀土贡献率则高达 89.25%。

片麻岩型 iRee 稀土浸取率最低,仅为 26.26%。说明在风化壳中,有很大一部分稀土元素难以直接浸取出来,可能在风化壳中存在难以风化的独立稀土矿物,如独居石等。从理论来讲,片岩、片麻岩具片状(片麻状)构造,其浸取率普遍偏低,因为片理状构造影响浸取液的流动,不易使浸取剂与稀土阳离子充分反应,稀土元素不能被完全置换出来。但变质岩原岩中的  $\Sigma$ REE 是花岗岩及火山岩的两倍左右,其风化壳中稀土含量依然可观,具有成矿潜力。

## 4 成矿模式

Wang Denghong et al. (2013b) 提出 iRee 是“内生外成”矿床,简明扼要的归纳出该矿床的成矿特点,指出矿床的形成同时受内生条件及外生条件的影响,成矿时间晚于成岩时间。因此在讨论此类矿床的成矿模式时,就需要同时考虑内生及外生条件。

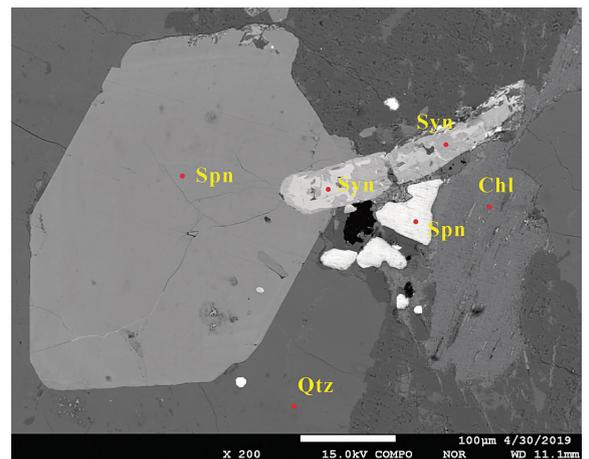


图 10 遂昌片麻岩中的稀土矿物

Fig. 10 Rare earth minerals in Suichang gneiss  
Qtz—石英;Spn—榍石;Chl—绿泥石;Syn—氟碳钙铈矿  
Qtz—Quartz;Spn—sphene;Chl—chlorite;Syn—synchysisite

在这一点上,前人对花岗岩型 iRee 的研究较为成熟(Tian Jun et al., 2006; Li Shehong et al., 2011; Li Hui, 2012; Chi Ru'an et al., 2012; Wang Ruijiang et al., 2015; Li Mingxiao et al., 2017; Lu Lei et al., 2019),虽然不同类型 iRee 的成矿母岩差异很大,火山岩型及变质岩型的研究较为薄弱,但是其成矿模式却相差无几(图 11)。

### 4.1 内生作用阶段

(1)成矿母岩是最重要的条件,一般具有较高的稀土背景值。岩体中的稀土矿物是成矿最主要的物质来源。浙东南各矿区中,荷花花岗斑岩的平均  $\Sigma$ REE 为  $271.39 \times 10^{-6}$ ,附近凝灰岩围岩  $\Sigma$ REE 约为  $253.36 \times 10^{-6}$ ,大柘片麻岩  $\Sigma$ REE 约为  $517.21 \times 10^{-6}$ 。地壳中  $\Sigma$ REE 平均丰度  $141.35 \times$

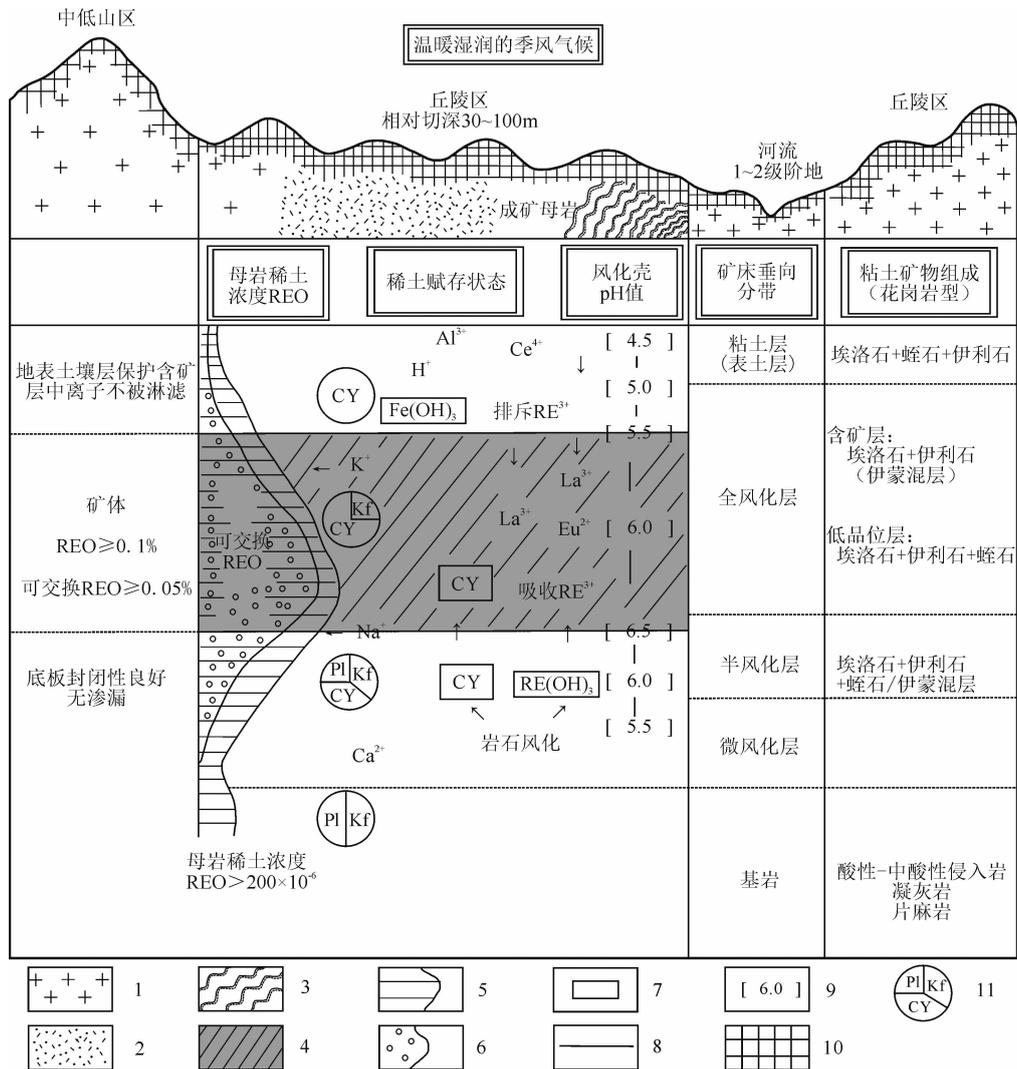


图 11 浙东南离子吸附型稀土矿床成矿模式图(据浙江省矿产地质志改绘<sup>②</sup>)

Fig. 11 Metallogenic model of ion-adsorbed rare earth deposits in southeastern Zhejiang (according to Geology and Mineral Resources of Zhejiang Province<sup>②</sup>)

- 1—花岗岩;2—凝灰岩;3—片麻岩;4—风化壳稀土矿体;5—稀土总量(REO)含量曲线;6—可交换稀土(REO)含量曲线;
- 7—胶体类型;8—分带线;9—pH值;10—风化壳;11—斜长石(Pl)钾长石(Kf)黏土矿物(CY)比例关系
- 1—Granite;2—tuff;3—gneiss;4—rare earth ore body;5—total rare earth (REO) content curve;
- 6—exchangeable rare earth (REO) content curve;7—colloid type;8—zoning line;9—pH value;10—weathering crust;
- 11—proportional relationship of plagioclase (Pl) potassium feldspar (Kf) clay minerals (CY)

$10^{-6}$ ,南岭含矿岩体的平均 $\Sigma REE$ 约为 $289 \times 10^{-6}$ 。由此可见,浙东南成矿母岩的稀土含量较高,具有形成 iRee 矿床的潜力。

前人(Xue Huaimin et al., 1996)根据地球化学特征及同位素特征,推断浙东南中生代酸性火山岩是由变质基底重熔形成。根据荷地岩体 Hf 同位素数据特征(笔者未发表数据),荷地岩体  $\epsilon_{Hf}(t) < 0$ ,  $T_{DM2} \gg t_{(U-Pb)}$ ,  $t - \epsilon_{Hf}(t)$  图解分布于上地壳线以上,也暗示岩浆来源以地壳重熔为主,加之遂昌八都群片麻岩与花岗岩体及其围岩具有相似的微量元素

与稀土元素分布特征(图 5),据此我们认为荷地周边的火山-侵入杂岩均有可能是前寒武纪八都群变质岩重熔形成。在片麻岩、花岗斑岩及凝灰岩三者中,片麻岩中稀土含量最高,而火山-侵入杂岩很可能来自于陆壳物质重熔再结晶形成,因此我们推断重熔再结晶过程中,发生了难熔稀土矿物(副矿物)的丢失或者稀土元素随残余岩浆迁移丢失。

(2)构造条件:目前虽无直接的证据表明矿床形成受构造因素控制,但是浙东南地区花岗岩型、火山岩型 iRee 均经历了中生代强烈的火山活动,南岭各

类离子吸附型稀土矿的成岩时间绝大多数也在燕山期。人们普遍认为成矿母岩经历了陆壳重熔或者幔源物质加入的重熔,这都需要构造运动来提供动力及能量(Wang Duzhao et al., 1984)。

#### 4.2 外生作用阶段

(1)气候:浙东南气候炎热潮湿、植被繁茂、氧气充足,属亚热带季风性气候,冬夏分明,能够促进原岩的风化,不仅形成大量黏土矿物,还能使矿物相的稀土元素解离,在水溶液中形成复杂的稀土阳离子。降雨充沛,雨水及地下水流通性较强,有利于稀土元素充分进行交换,并在有利层位(全风化层)富集成矿。但是如果温差过大,风化作用过于强烈,也容易造成解离出的稀土流失,不利于稀土的吸附富集。

(2)地形方面,浙东南大多矿区位于低矮的山地丘陵,利于保存厚大的风化壳;而在平原、盆地则不利于风化壳的形成;较高的山地往往受到强烈的剥蚀作用,形成的风化壳难以保存。对于荷花花岗斑岩及凝灰岩风化壳而言,风化壳垂向厚度山顶>山脊>山腰>山底,因此矿体厚度也具有类似的趋势。

(3)pH:浙东南三类成矿母岩中的长石、云母等造岩矿物发生蚀变,形成高岭石、埃洛石等黏土矿物,作为稀土元素的载体矿物,其中花岗斑岩全风化层中,黏土矿物主要由伊利石(15%)及埃洛石(80%)组成,伊利石的pH稳定范围为6~7,而埃洛石的存在环境则偏酸性;虽然黏土矿物具有多水性及pH缓冲能力,但是超过一定范围,其性质也会发生改变,过酸或过碱条件均不利于黏土矿物对稀土阳离子的吸附:一般在pH为5.7~6.3的弱酸性溶液中,RE<sup>3+</sup>会随着水溶液迁移,而在中性或者过酸、过碱溶液中,则会倾向形成碳酸盐和重碳酸盐,不利于RE<sup>3+</sup>的迁移(Chi Ru'an et al., 2007; Nesbit et al., 1979)。

(4)氧化还原条件:一方面,氧化还原条件会影响风化壳中各种微生物及植物的种类与生长,影响化学风化作用及生物风化作用的程度(Chen Zhicheng et al., 1994);另一方面,残坡积层主要为氧化环境,且受动植物及大气中CO<sub>2</sub>影响,水介质表现为酸性,矿物相稀土元素被解离,在此环境下不利于黏土矿物对稀土元素的吸附,因此离子相稀土向下迁移,但Ce<sup>3+</sup>常被氧化成Ce<sup>4+</sup>,而Ce<sup>4+</sup>不稳定,易沉淀,不利于迁移富集。这就是全岩中Ce元素含量很高,而其浸取率却最低的缘故。

当离子相稀土元素迁移至全风化层时,氧化性变弱,pH增大至5.7~6.3的弱酸性环境,黏土矿

物对稀土离子产生很强吸附性,稀土元素便在该层富集。至半风化层时,离子相稀土含量锐减,风化作用减弱、黏土矿物含量减少,因此被吸附的稀土含量也较少。到基岩底板,风化作用微弱,稀土矿物解离较少,稀土元素主要以矿物相存在。

此外,稀土元素在迁移过程中还会发生分异。风化壳中稀土配分大多会继承原岩的稀土配分,但部分也会因黏土矿物吸附、元素自身性质而产生差异。一般表现为上层轻稀土高,下层重稀土高,且顶端特别富铈(Chi Ru'an et al., 1996)。

不同母岩类型的稀土矿床控矿因素大致相同,均受内外生作用条件的影响,但是不同因素对不同类型矿床的影响大小不同。首先,浙东南片麻岩的稀土含量明显高于花岗岩和凝灰岩,但其稀土矿物抗风化能力也强于花岗岩和凝灰岩中的稀土矿物,因此就需要更强的风化作用才能解离稀土矿物,并打破其片理化构造,使得稀土元素在浸取时能够与浸取液充分反应。

其次,不同岩性的组成矿物不同,后期风化后黏土矿物种类也不尽相同,其吸附性强弱不同。一般来讲,TOT型黏土矿物(蒙脱石、伊利石等)>链状黏土矿物(凹凸棒土等)>TO型黏土矿物(高岭石、埃洛石等)。对于每种黏土矿物,达到其最强吸附性所需的条件不同,如蒙脱石在偏酸条件下吸附性较好,三水铝石则对pH不敏感,在中性或弱酸性条件下其吸附性变化不大。

## 5 找矿方向及远景区

浙东南广泛的岩浆活动、多期次变质叠加改造,形成了区内广泛分布的火山-侵入杂岩体及区域变质岩系,为稀土成矿提供了原岩条件。浙江省第七地质大队在搜集前人资料后,在全省范围内初选了25个有潜力的地质体进行分析测试,最后圈定出12个稀土成矿远景区(图1)。

不同类型的iRee矿床,具有不同的成矿作用特点,因此也具有不尽相同的找矿方向。

花岗岩型iRee成矿母岩主要为燕山期中酸性岩株,时间上以燕山晚期为主,其次为燕山早期,而晋宁期、喜马拉雅期等岩体ΣREE含量较低,成矿潜力较低,岩石化学成分以富SiO<sub>2</sub>,高K<sub>2</sub>O,且K<sub>2</sub>O>Na<sub>2</sub>O为特征。成矿母岩既有浅成的花岗斑岩类,如黑云二长花岗斑岩、石英正长斑岩等;也有深成的花岗岩类,如角闪石黑云母花岗岩、黑云母花岗岩等。该类型矿床在地理位置上以纬度偏低的浙闽

交界潜力较大,靠近东部沿海的一些侵入岩体也具有一定的成矿潜力。

火山岩型 iRee 成矿母岩主要为流纹质晶屑凝灰岩或玻屑晶屑含砾熔凝灰岩,多为燕山期岩体同期的火山-侵入杂岩体。这类矿床多与花岗岩型在空间上相邻分布,主要在浙闽交界附近分布。

变质岩型 iRee 成矿母岩主要为(矽线)黑云片麻岩、花岗片麻岩、黑云(二云)斜长(二长)片麻岩类以及少量片岩及变粒岩,时间跨度较大,从太古宙到中元古代变质岩均可成矿,但以八都群片麻岩稀土含量最高。空间上主要分布在衢州-遂昌-龙泉一带。

除此之外,赋矿层位风化壳厚度一般在 10m 左右,最大 20 余米。花岗斑岩型出露面积相比于火山岩型及变质岩型较小,普遍在 30~60km<sup>2</sup>,而火山岩及变质岩出露一般在 100km<sup>2</sup> 以上。

## 6 结论

(1)浙东南地区 iRee 矿床成矿条件较好,荷地花岗斑岩的平均  $\Sigma$ REE 为  $271.39 \times 10^{-6}$ ,凝灰岩围岩  $\Sigma$ REE 平均为  $253.36 \times 10^{-6}$ ,大柘片麻岩  $\Sigma$ REE 约为  $517.21 \times 10^{-6}$ ,而南岭含矿岩体的平均  $\Sigma$ REE 约为  $289 \times 10^{-6}$ ,因此区内具备较好的成矿母岩条件。亚热带季风条件下风化作用较强,形成垂向较厚的风化壳,底板的基岩以及周围环境能够使淋滤下来的稀土保存,便于后期富集成矿。

(2)以浙东南目前所做工作来讲,稀土元素在原岩中主要以矿物相及类质同象形式存在,独立的稀土矿物及少量的副矿物为矿床成矿提供物源,岩石中占比很大的造岩矿物并未提供很多稀土成矿物质。而对于风化壳来讲,稀土元素主要以水合或羟基水合阳离子形式被吸附于黏土矿物表面,但浙东南稀土矿浸取率普遍偏低,花岗岩型 iRee 最高(平均 51.60%),凝灰岩型次之(平均 38.28%),片麻岩型最低(26.26%)。因此在后期工业利用时,需考虑改进工艺、优化流程以提高浸取率。

(3)今后浙东南找矿仍需在前人工作基础上开展,重点关注燕山期花岗岩、花岗斑岩及其附近火山岩体,关注八都群片麻岩,由风化壳入手开展工作,确定远景区范围。

**致谢:**本项工作在陈毓川院士和王登红研究员的指导下完成。感谢中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室、国家地质实验测试中心等离子质谱实验室在实验操作及数据处理方面给予的帮

助,感谢浙江第七地质大队樊锡银副总工程师,党晓亮工程师及张伟工程师在野外期间的支持,在此表示最诚挚的谢意。

## 注 释

- ① 浙江省第七地质大队. 2018. 浙江稀有稀土和稀散矿产调查评价报告.
- ② 浙江省地质矿产志编撰委员会. 2003. 浙江省地质矿产志.
- ③ 浙江省第七地质大队. 2016. 浙江省庆元县荷地-岭头矿区稀土矿普查报告.

## References

- Chen Zhicheng, Chen Dahui, Yu Shoujun, Zhuang Wenming, Fu Qunce. 1994. Preliminary study on the role of organic matter in dissolution, migration and concentration of rare earth elements in weathering crust of granites from South China. *Geochimica*, 23(2):168 (in Chinese without English abstract).
- Chi Ru'an, Xu Jingming, He Peijiong, Zhu Yongjun. 1995. REE geochemistry of granitoid weathering crust and properties of ores in southern China. *Geochimica*, 24(3):261~259 (in Chinese with English abstract).
- Chi Ru'an, Wang Dianzuo. 1996. Occurrence of rare earth in ore and selection of separation and concentration technology. *Chinese Journal of Rare Metals*, 20(4):241~246 (in Chinese without English abstract).
- Chi Ru'an, Tian Jun, Li Zhongjun, Peng Cui, Wu Yuanxin, Li Shirong, Wang Cunwen, Zhou Zhiang. 2005. Existing state and partitioning of rare earth on weathered ores. *Journal of Rare Earths*, 23(6):756~760.
- Chi Ru'an, Tian Jun. 2007. Review of weathered crust rare earth ore. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 25(6):641~650 (in Chinese with English abstract).
- Chi Ru'an, Tian Jun, Luo Xianping, Xu Zhigao, He Zhengyan. 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).
- Chi Ru'an, Liu Xuemei. 2019. Prospect and development of weathered crust Elution-deposited rare earth ore. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 37(2):129~140 (in Chinese with English abstract).
- Deng Maochun, Wang Denghong, Zeng Zailin, Zhang Yongzhong, Zhao Zhi, Zou Xinyong, Chen Bin Feng. 2013. Evaluation of delineation methods for ion-adsorption type rare earth ore body. *Rock and Mineral Analysis*, 32(5):803~809 (in Chinese with English abstract).
- Gao Yanjun, Gao Jishan, Zhai Lina, Ying Lan. 1986. Characteristics of infrared-spectrum of zircons from Yanshanian granitic rocks of two genetic types related to mineralogenesis in Nanling region. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 5(1):2~11 (in Chinese with English abstract).
- Hannigan R E, Sholkovitz E R. 2001. The development of middle rare earth element enrichments in freshwaters: weathering of phosphate minerals. *Chemical Geology*, 175(3):495~508.
- He Lunyan, Wang Sinan. 1989. Ion-adsorbed rare earth ores in southern China. *Chinese Rare Earths*, (1):39~48 (in Chinese without English abstract).
- Hou Jianglong, Wang Denghong, Wang Chenghui, Huang Fan, Li Jiankang, Chen Zhenyu. 2017. Study on the types, and metallogenic and diagenetic environment of tourmaline from the Zhongzuo pegmatite veins in Quyang County, Hebei Province. *Rock and Mineral Analysis*, 36(05):529~537+450 (in Chinese with English abstract).
- Hu Peng, Wu Yue, Zhang Changqin, Hu Mingyue. 2014. Trace and minor elements in sphalerite from the Mayuan lead-zinc

- deposit, northern margin of the Yangtze Plate; implications from LA-ICP-MS analysis. *Acta Mineralogica Sinica*, 34(04): 461~468 (in Chinese with English abstract).
- Hu Xiongjian. 1993. A summary for regional metamorphic rocks classification in southeast Zhejiang province. *Geology of Zhejiang*, 9(2): 1~9 (in Chinese with English abstract).
- Hua Renmin. 2005. Differences between rock-forming and related ore-forming times for the Mesozoic granitoids of crust remelting types in the Nanling range, South China, and its geological significance. *Geological Review*, 54(6): 633~639 (in Chinese with English abstract).
- Hua Renmin, Chen Peirong, Zhang Wenlan, Yao Junming, Lin Jinfu, Zhang Zhanshi, Gu Shengyan. 2005. Metallogenesis and their geodynamic settings related to Mesozoic granitoids in the Nanling range. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 291~304 (in Chinese with English abstract).
- Hua Renmin, Zhang Wenlan, Gu Shengyan, Chen Peirong. 2007. Comparison between REE granite and W-Sn granite in the Nanling region, South China, and their mineralizations. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2321~2328 (in Chinese with English abstract).
- Huang Dianhao, Wu Chengyu, Han Jiuzhu. 1988. REE geochemistry and mineralization characteristics of the Zudong and Guanxi granites, Jiangxi Province. *Chinese Journal of Geology*, 4: 311~328 (in Chinese with English abstract).
- Huo Minyuan. 1992. Distribution characteristics of the weathering crust type rare earth resources in Nanling, China. *Journal of Natural Resources*, 7(1): 64~70 (in Chinese with English abstract).
- Li Hui, Xu Zhigao, Yu Junxia, Zhang Yuefei, Chi Ru'an. 2012. Study on ore properties of the weathered crust Elution-deposited rare earth ore and rare earth contents in various Grain-size. *Chinese Rare Earths*, 33(2): 14~18 (in Chinese with English abstract).
- Li Mingxiao, Wang Gang. 2017. Study on the processing mineralogy of rare earth ore in Yunnan. *Metal Mine*, 11: 108~121 (in Chinese with English abstract).
- Li Shehong, Pan Xinkui, Liao Binkui, Yaoming, Pi Qiaohui, Liu Xiang, Zhang Qinwei. 2011. Metallogenic regularity and prospecting potential of ion-adsorbed rare earth deposits: A case study of Gupo Mountain in Guangxi and Xinfeng area in Guangdong. *Acta Mineralogica Sinica*, 253~255 (in Chinese without English abstract).
- Li Wen. 1995. Geological and geochemical characteristics of an ion adsorption type's REE deposit in granitic weathered crust in Raoping county Guangdong province. *Natural Science Journal of the Graduates, Sun Yat-san University*, 16(3): 37~46 (in Chinese with English abstract).
- Liang Guoxing, Chi Ru'an, Zhu Guocai. 1997. Study on ore property of weather-type rare earth minerals. *Chinese Rare Earths*, 18(5): 5~9 (in Chinese with English abstract).
- Lu Lei, Wang Denghong, Wang Chenghui, Zhao Zhi, Feng Wenjie, Xu Xiaochun, Yu Feng. 2019. Mineralization regularity of ion-adsorption type REE deposits on Lincang granite in Yunnan province. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1466~1478.
- Nesbit H W. 1979. Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite. *Nature*, 279: 206.
- Shu Liangshu, Zhou Xinmin, Deng Ping, Yu Xinqi. 2006. Principal geological features of Nanling tectonic belt, South China. *Geological Review*, 5(2): 251~265 (in Chinese with English abstract).
- Tian Jun, Yin Jingqun, Ouyang Kexian, Chi Ru'an. 2006. Development progress and research connotation of green chemistry of extraction process of rare earth from weathering crust Elution-deposited rare earth ores in China. *Chinese Rare Earths*, 27(1): 70~73 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chengliang, Fan Xiyin, Zhang Yujie, Zhou Lianghui, Hu Jiali. 2017. Prospect analysis and policy suggestions of ion adsorption rare earth resources in weathering crust of Zhejiang province. *Zhejiang Land & Resources*, (5): 41~46 (in Chinese without English abstract).
- Wang Denghong, Chen Yuchuan, Wang Ruijiang, Huang Fan, Wang Yonglei. 2013a. Discussion on some problems related to prospecting breakthrough in Nanling region. *Mineral Deposits*, 32(4): 854~863 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Zhao Zhi, Yu Yang, Li Jiankang, Dai Jingjing, Liu Xinxing. 2013b. Progress, problems and research orientation of ion-adsorption type rare earth resources. *Rock and Mineral Analysis*, 32(5): 796~802 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Wang Ruijiang, Sun Yan, Li Jiankang, Zhao Zhi, Zhao Ting, Qu Wenjun, Fu Xiaofang, Jiang Shanyuan, Huang Huagu, Feng Wenjie, Xu Ping, Li Shengmiao, Huang Xinpeng, Zhou Hui, Zhu Yongxin, Tu Qijun, Li Xinren, Fang Yiping, Zhou Yuanyuan. 2016. A review of achievements in the three-type rare mineral resources (rare resources, rare earth and rarely scattered resources) survey in China. *Acta Geoscientia Sinica*, 37(5): 569~580 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Zhao Zhi, Yu Yang, Wang Chenghui, Dai Jingjing, Sun Yan, Zhao Ting, Li Jiankang, Huang Fan, Chen Zhenyu, Zeng Zailin, Deng Maochun, Zou Xinyong, Huang Huagu, Zhou Hui, Feng Wenjie. 2017. A review of the achievements in the survey and study of ion-absorption type REE deposits in China. *Acta Geoscientia Sinica*, 38(3): 317~325 (in Chinese with English abstract).
- Wang Duzhao. 1984. The mineralization processes and minerogenetic model of the rare earth-rare metal deposits related to the granitoids of Nanling region. *Mineral Deposits*, 3(1): 58~66 (in Chinese with English abstract).
- Wu Chengyu, Huang Dianhao, Bai Ge, Ding Xiaoshi. 1990. Differentiation of rare earth elements and origin of granitic rocks, Nanling Mountain area. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 9(2): 106~117 (in Chinese with English abstract).
- Wu Chengyu, Bai Ge, Huang Dianhao, Zhu Zhengshu. 1992. Characteristics and significance of HREE-rich granitoids of the Nanling mountain area. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, (25): 43~58 (in Chinese with English abstract).
- Xue Huaimin, Tao Kuiyuan, Shen Jialin. 1996. Sr and Nd isotopic characteristics and magma genesis of Mesozoic volcanic rocks along the coastal region of southeastern China. *Acta Geologica Sinica*, (1): 35~47.
- Yang Wencai. 2018. Crustal density imaging of Yangtze craton and formation of the Yanshanian granitites in South China. *Geological Review*, 64(5): 1045~1054 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xueming, Zhang Peishan. 1992. Study on the occurrence and mass balance of rare earth elements in granite. *Chinese Rare Earths*, 13(5): 6~11 (in Chinese without English abstract).
- Yang Yueqing, Hu Chongsheng, Luo Zhanming. 1981. Geological characteristic of mineralization of rare earth deposit of the ion-adsorption type and their prospecting direction. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 2(1): 102~118 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhuming. 1987. Study on clay minerals in rare earth weathering crust of Longnan granite in Jiangxi province. *Scientia Geologica Sinica*, 1: 70~81 (in Chinese without English abstract).
- Yu Guohua, Bao Chaomin, Fang Binxing, Ma Wuping, Song Fuquan, He Shence. 1995. Brief introduction to the achievements on lithostatic clearing in Zhejiang. *Geology of Zhejiang*, 11(1): 1~14 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zuhai. 1990. A study on weathering crust ion adsorption type REE deposits, South China. *Contributions To Geology and Mineral Resources Research*, 5(1): 57~71 (in Chinese with English abstract).

English abstract).

- Zhao Zhi, Wang Denghong, Chen Zhenyu, Guo Naxin, Liu Xinxing, He Hanhan. 2014. Metallogenic specialization of rare earth mineralized igneous rocks in the eastern Nanling region. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(2): 255~263 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhi, Wang Denghong, Chen Zhenghui, Chen Zhenyu. 2017. The progress in the strategic research and survey of rare earth, rare metal and rare-scattered elements mineral resources. *Acta Geologica Sinica*, 91(12): 2814~2827 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhi, Wang Denghong, Wang Chenghui, Wang Zhen, Zou Xinyong, Feng Wenjie, Zhou Hui, Huang Xinpeng, Huang Huagu. 2019. Progress in prospecting and research of ion-adsorption type REE deposits. *Acta Geologica Sinica*, 96(6): 1454~1465 (in Chinese with English abstract).

## 参 考 文 献

- 陈志澄, 陈达慧, 俞受黎, 庄文明, 洪华华, 符群策. 1994. 试论有机质在华南花岗岩风化壳 REE 溶出, 迁移和富集中的作用. *地球化学*, 23(2): 168.
- 池汝安, 徐景明, 何培炯, 朱永贍. 1995. 华南花岗岩风化壳中稀土元素地球化学及矿石性质研究. *地球化学*, 24(3): 261~259.
- 池汝安, 王淀佐. 1996. 矿石中稀土赋存状态与分选富集工艺选择. *稀有金属*, 20(4): 241~246.
- 池汝安, 田君. 2007. 风化壳淋积型稀土矿评述. *中国稀土学报*, 25(6): 641~650.
- 池汝安, 田君, 罗仙平, 徐志高, 何正艳. 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.
- 池汝安, 刘雪梅. 2019. 风化壳淋积型稀土矿开发的现状及展望. *中国稀土学报*, 37(2): 129~140.
- 邓茂春, 王登红, 曾载淋, 张永忠, 赵芝, 邹新勇, 陈斌锋. 2013. 风化壳离子吸附型稀土矿圈矿方法评价. *岩矿测试*, 32(5): 803~809.
- 高艳君, 高善继, 翟丽娜, 应兰. 1986. 南岭地区燕山期与成矿有关的两种不同成因花岗岩中锆石的红外光谱特征. *岩石矿物学杂志*, 5(1): 2~11.
- 贺伦燕, 王似男. 1989. 我国南方离子吸附型稀土矿. *稀土*, (1): 39~48.
- 胡鹏, 吴越, 张长青, 胡明月. 2014. 扬子板块北缘马元铅锌矿床闪锌矿 LA-ICP-MS 微量元素特征与指示意义. *矿物学报*, 34(04): 461~468.
- 胡雄建. 1993. 浙东南区域变质岩系列分综述. *浙江地质*, 9(2): 1~9.
- 华仁民. 2005. 南岭中生代陆壳重熔型花岗岩类成岩——成矿的时间差及其地质意义. *地质评论*, 54(6): 633~639.
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 姚军明, 林锦富, 张展适, 顾晟彦. 2005. 南岭与中生代花岗岩类有关的成矿作用及其大地构造背景. *高校地质学报*, 11(3): 291~304.
- 华仁民, 张文兰, 顾晟彦, 陈培荣. 2007. 南岭稀土花岗岩、钨锡花岗岩及其成矿作用的对比. *岩石学报*, 23(10): 2321~2328.
- 侯江龙, 王登红, 王成辉, 黄凡, 李建康, 陈振宇. 2017. 河北曲阳县中佐伟晶岩脉中电气石的类型和成岩成矿环境研究. *岩矿测试*, 36(05): 529~537+450.
- 黄典豪, 吴澄宇, 韩久竹. 1988. 江西足洞和关西花岗岩的稀土元素地球化学及矿化特征. *地质学报*, 4: 311~328.
- 霍明远. 1992. 中国南岭风化壳型稀土资源分布特征. *自然资源学报*, 7(1): 64~70.
- 李慧, 徐志高, 余军霞, 张越非, 池汝安. 2012. 风化壳淋积型稀土矿矿石性质及稀土在各粒级上的分布. *稀土*, 33(2): 14~18.
- 李明晓, 王刚. 2017. 云南某稀土矿石工艺矿物学研究. *金属矿山*, 11: 108~121.
- 李社宏, 潘新奎, 缪秉魁, 姚明, 皮乔辉, 刘祥, 张青伟. 2011. 离子吸附型稀土矿床成矿规律及找矿潜力——以广西姑婆山和广东新丰地区为例. *矿物学报*, 253~255.

- 李文. 1995. 广东饶平县某花岗岩风化壳离子吸附型稀土矿床的地质地球化学特征. *中山大学研究生学刊(自然科学. 医学版)*, 16(3): 37~46.
- 梁国兴, 池汝安, 朱国才. 1997. 风化型稀土矿的矿石性质研究. *稀土*, 18(5): 5~9.
- 陆蕾, 王登红, 王成辉, 赵芝, 冯文杰, 徐晓春, 于枫. 2019. 云南临沧花岗岩中离子吸附型稀土矿床的成矿规律. *地质学报*, 93(6): 1466~1478.
- 舒良树, 周新民, 邓平, 余心起. 2006. 南岭构造带的基本地质特征. *地质评论*, 5(2): 251~265.
- 田君, 尹敬群, 欧阳克氩, 池汝安. 2006. 风化壳淋积型稀土矿提取工艺绿色化学内涵与发展. *稀土*, 27(1): 70~73.
- 王成良, 樊锡银, 张玉洁, 周良慧, 胡家良. 2017. 浙江省风化壳离子吸附型稀土资源远景浅析及政策建议. *浙江国土资源*, (5): 41~46.
- 王登红, 陈毓川, 王瑞江, 黄凡, 王永磊. 2013a. 对南岭与找矿有关问题的探讨. *矿床地质*, 32(4): 854~863.
- 王登红, 赵芝, 于扬, 李建康, 代晶晶, 刘新星, 何晗晗. 2013b. 离子吸附型稀土资源研究进展、存在问题及今后研究方向. *岩矿测试*, 32(5): 796~802.
- 王登红, 王瑞江, 孙艳, 李建康, 赵芝, 赵汀, 屈文俊, 付小方, 江善元, 黄华谷, 冯文杰, 徐平, 李胜苗, 黄新鹏, 周辉, 朱永新, 涂其军, 李新仁, 方一平, 周园园. 2016. 我国三稀(稀有稀土稀散)矿产资源调查研究成果综述. *地球学报*, 37(5): 569~580.
- 王登红, 赵芝, 于扬, 王成辉, 代晶晶, 孙艳, 赵汀, 李建康, 黄凡, 陈振宇, 曾载淋, 邓茂春, 邹新勇, 黄华谷, 周辉, 冯文杰. 2017. 我国离子吸附型稀土矿产科学研究和调查评价新进展. *地球学报*, 38(3): 317~325.
- 王笃昭. 1984. 南岭地区与花岗岩有关的稀土、稀有元素成矿作用演化与成矿模式. *矿床地质*, 3(1): 58~66.
- 王瑞江, 王登红. 2015. 稀有稀土稀散矿产资源及其开发利用. *地质出版社*, 3: 148~218.
- 吴澄宇, 黄典豪, 白鸽, 丁孝石. 1990. 南岭花岗岩类起源与稀土元素的分馏. *岩石矿物学杂志*, 9(2): 106~117.
- 吴澄宇, 白鸽, 黄典豪, 朱正书. 1992. 南岭富重稀土花岗岩类的特征和意义. *地球学报*, (25)43~58.
- 夏卫华, 章锦统, 冯志文. 1989. 南岭花岗岩型稀有金属矿床地质. *武汉: 中国地质大学出版社*, 1~123.
- 徐克勤, 涂光焯. 1984. 花岗岩地质与成矿关系. *南京: 江苏科技出版社*, 1~645.
- 薛怀民, 陶奎元, 沈加林. 1996. 中国东南沿海中生代酸性火山岩的铍和钽同位素特征与岩浆成因. *地质学报*, (1): 35~47.
- 杨文采. 2018. 扬子区地壳密度扰动成像和华南燕山期花岗岩成因. *地质评论*, 64(5): 1045~1054.
- 杨学明, 张培善. 1992. 花岗岩中稀土元素的赋存状态及质量平衡研究. *稀土*, 13(5): 6~11.
- 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. *中国地质科学院矿床地质研究所文集*, 2(1): 102~118.
- 杨志明. 1987. 江西龙南花岗岩稀土风化壳中黏土矿物的研究. *地质科学*, 1: 70~81.
- 俞国华, 包超民, 方炳兴, 马武平, 宋福泉, 何圣策. 1995. 浙江省岩石地层清理成果简介. *浙江国土资源*, 11(1): 1~14.
- 俞国华. 1996. 浙江省岩石地层. *武汉: 中国地质大学出版社*.
- 袁忠信, 李建康. 2012. 中国稀土矿床成矿规律. *地质出版社*, 12: 1~100.
- 张祖海. 1990. 华南风化壳离子吸附型稀土矿床. *地质找矿论丛*, 5(1): 57~71.
- 赵芝, 王登红, 陈振宇, 郭娜欣, 刘新星, 何晗晗. 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, 陈振宇. 2017. 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, 王成辉, 王臻, 邹新勇, 冯文杰, 周辉, 黄新鹏, 黄

华谷. 2019. 离子吸附型稀土找矿及研究新进展. 地质学报,

93(6): 1454~1465.

## A discussion on the metallogenic regularity and prospecting direction of ion-absorption type rare earth deposits in southeastern Zhejiang Province

CHEN Chen<sup>1)</sup>, WANG Chenghui\*<sup>1)</sup>, ZHAO Zhi<sup>1)</sup>, YANG Yueqing<sup>1)</sup>, FAN Xiyin<sup>2)</sup>,  
DANG Xiaoliang<sup>2)</sup>, ZHANG Wei<sup>2)</sup>

1) MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resource, CAGS, Beijing, 100037;

2) The Seventh Geological Brigade of Zhejiang Province, Lishui, Zhejiang, 323000

\* Corresponding author: wangchenghui131@sina.com

### Abstract

In order to explore the geological characteristics, factors influencing ore-formation, migration and occurrence of rare earth elements of ion-adsorption type rare earth deposit in southeastern Zhejiang Province, and to delineate the ore-forming prospect area, this study systematically sampled the outcropped granite porphyry ion-adsorption type rare earth, volcanic ion-adsorption type rare earth and metamorphic ion-adsorption type rare earth, and made a comparative study of various ion-adsorption type rare earth profiles using petrography and rock geochemistry. The results show that the average  $\sum\text{REE}$  of Hedi granite porphyry is  $271.39 \times 10^{-6}$ , the average  $\sum\text{REE}$  of tuff is  $253.36 \times 10^{-6}$ , the average  $\sum\text{REE}$  of Dazhe gneiss is  $517.21 \times 10^{-6}$ , and the average  $\sum\text{REE}$  of Nanling ore-bearing rock is  $289 \times 10^{-6}$ , which indicates that ion-adsorption type rare earth deposit in southeast Zhejiang Province have good ore-forming rock conditions. In addition, by determining the content of rare earth elements in the original rocks, it was found that the rare earth elements mainly exist in independent rare earth minerals and a small amount of accessory minerals which are the main source of ore-forming materials. By comparing the weathering crust profiles it was found that the geochemical characteristics of rare earth elements mainly retain the properties of the original rocks, while the exogenous conditions cause secondary enrichment of the rare earth elements. On the basis of this study, combined with the results of previous research work, this paper presents a preliminary summary of the metallogenic regularity of ion-adsorption type rare earth ore deposits in the area, and discusses future prospecting directions.

**Key words:** ion-absorption type rare earth deposits; southeastern Zhejiang; metallogenic regularity