文章编号：1004-0609(2012)03-0784-11

稀土元素地球化学在成矿系统厘定及矿床成因分析中的应用——以印度尼西亚塔里亚布岛铁多金属矿田为例

韩世礼[1,2]，张术根[1,2]，丁 俊[1,2]，徐忠发[3]，秦新龙[3]

(1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室，长沙 410083；
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院，长沙 410083；3. 有色金属华东地质勘查局，南京 210007)

摘 要：以印度尼西亚塔里亚布岛铁多金属矿田为典型实例，探讨了稀土元素地球化学在厘定成矿系统中的作用及相同成矿系统的稀土元素地球化学叠加与演化规律。研究表明：除辉绿岩外，花岗岩、大理岩、变质砂岩及矽卡岩都是铁多金属成矿系统的组成部分，矿浆型和矽卡岩型磁铁矿矿石及铜锌硫化物矿石均属相同系统的成矿作用产物。矿浆型磁铁矿矿石为该系统的一个相对独立的子系统，即印支期花岗岩结晶分异成矿系统；矽卡岩型磁铁矿矿石和热液充填交代型铜锌硫化物矿石同属一个子系统，即接触交代成矿系统；两个子系统是一个从岩浆阶段至热液阶段的完整成矿演化系列。从矿浆型矿石至接触交代型再到热液充填交代型负铕异常逐渐减弱，分馏程度逐渐增强，由重稀土富集型转变为轻稀土富集型。因此，稀土元素地球化学研究是厘定复杂成矿系统、分析矿床成因的有效手段。

关键词：塔里亚布岛；稀土元素；铁多金属矿；矿浆型；接触交代型；热液充填交代型
中图分类号：P595 **文献标志码**：A

REE geochemistry application in discrimination of metallogenic system and ore genesis: An example from iron polymetallic orefield in Taliabu Island, Indonesia

HAN Shi-li[1,2], ZHANG Shu-gen[1,2], DING Jun[1,2], XU Zhong-fa[3], QIN Xin-long[3]

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;
3. East China Mineral Exploration and Development Bureau, Nanjing 210007, China)

Abstract: Taking the iron polymetallic orefield in Taliabu Island, Indonesia as an example, the application of REE geochemistry in discrimination of metallogenic system and the regularities of REE superposition and evolution in the same mineralization system were investigated. The results show that in Taliabu Island, granite, marble, metamorphic sandstone and skarn are the composition parts of the iron polymetallic metallogenic system except for diabase. Ore magma and skarn magnetite ores as well as Cu-Zn sulfide ores are originated from the same metallogenic system. In this system, ore magma type is a relatively independent subsystem, that is, a crystal fractionation system of Indosinian granites; skarn type and hydrothermal filling type belong to another subsystem, that is, a contact metasomatic metallogenic system. Two subsystems belong to a complete mineralization system from magma stage to hydrothermal stage. From ore magma type to skarn type to hydrothermal filling type, negative Eu anomaly decreases, REE fractionation degree increases, and HREE enrichment converts to LREE enrichment gradually. Therefore, REE geochemistry is an effective method in discriminating mineralization system and ore genesis.

Key words: Taliabu island; REE; iron polymetallic deposit; ore magma type; contact metasomatism type; hydrothermal filling type

基金项目：中南大学与华东有色地勘集团合作项目
收稿日期：2011-12-01；**修订日期**：2012-01-04
通信作者：张术根，教授，博士；电话：0731-88877077; E-mail: zhangshugenzsg@163.com

塔里亚布岛属印度尼西亚东部的苏拉群岛，新近发现的大型铁多金属矿田，属东南亚铁多金属成矿带的东延部分[1]。该矿田铁多金属矿床无论成矿背景、成因机理或矿床地质地球化学特征的研究尚属开端。稀土元素作为一组揭示成矿物质来源、成矿条件及矿床成因的示踪剂元素，在岩石学领域特别是在岩浆岩及岩浆起源及演化方面已得到广泛应用[2−3]，而稀土元素在矿床学领域的应用研究特别是同一成矿系统不同成矿类型的稀土特征研究相对薄弱。目前，有关磁铁矿、铅锌矿和铜多金属矿等单一成矿类型矿床的稀土元素地球化学的应用研究[4−9]已经很多，而运用稀土元素地球化学特征来厘定成矿系统并讨论成矿作用叠加及演化的稀土地球化学行为却少有报道。该矿田的主要地质体包括花岗岩、辉绿岩、大理岩、变质砂岩、矽卡岩、磁铁矿矿体和铜锌硫化物矿体。不同类型的岩浆岩、地层是否都参与铁多金属成矿？不同类型矿体是否为相同成矿系统的产物？该成矿系统的不同矿床(体)是否属于同一成因类型？本文作者试图运用稀土元素地球化学研究的方法，从该矿田不同地质体(矿体)的稀土元素特征讨论这些问题，为铁多金属矿床成矿规律及成矿预测研究提供了新的地质地球化学信息依据。

1　成矿地质背景及矿床地质概况

塔里亚布铁多金属矿田位于印度尼西亚北马鲁古省苏拉群岛县塔里亚布岛西部地区[10]。苏拉群岛位于东南亚陆缘壳体北缘，归属北伊利安地槽区南部边缘部分，靠近该地槽区与班达海地槽区、苏拉威西海地槽区的交接过渡部位，同时也是东南亚锡铁成矿带的延伸部位[11]。研究区出露地层主要有石炭系 Mennanga 组(Pzmm)、侏罗系 Bobong 组(Jbs)的及第四系(Q)[1]。石炭系地层岩石类型主要为变质砂岩、变质碳酸盐岩(大理岩、白云质大理岩)和变质泥质粉砂岩；侏罗系地层岩石类型主要为砾岩、砂岩夹页岩、泥质炭质页岩、钙质黏土岩及石英砂岩夹钙屑灰岩。区内发育近南北向、北东向、北西向及近东西向 4 组断裂，主构造为北西向。矿体主要分布在印支期花岗岩与石炭系上部 Pzmm 地层的接触界面附近。

2　样品采集与分析

为研究塔里亚布岛铁多金属矿田的稀土元素地球化学特征，分别在 1 区、2 区和 J 区对不同类型的岩(矿)石进行地球化学采样，样品质量 500 g 左右，室内切制薄(光)片后，再进行样品加工。样品经过洗涤、烘干后先破碎再加工到 75 μm，每个样品质量约 100 g。稀土含量由核工业二三零研究所分析测试中心采用等离子质谱分析法(ICP−MS)测定。部分样品 Cu、Pb 和 Zn 含量由中南大学地质研究所采用原子吸收光谱法测定。

选择花岗岩、辉绿岩、大理岩、变质砂岩、矽卡岩和不同类型矿体的代表性样品进行稀土元素赫尔曼球粒陨石标准化计算，不同地质体稀土元素的原始分析数据和特征参数及部分样品 Cu、Pb 和 Zn 的含量见表 1~2，不同地质体稀土元素标准化配分模式见图 1。

3　不同地质体的稀土元素分布模式

3.1　岩浆岩稀土元素分布模式

1) 花岗岩：各样品稀土配分模式基本相似，均为右倾曲线，轻稀土元素段曲线较陡，重稀土段较缓，各样品大致呈平行排列，具强烈铕亏损的轻稀土富集型分布模式(见图 1(a))。稀土总量∑w(REE)普遍较高，在 115.81×10^{-6}~246.58×10^{-6} 之间，平均含量为 195.02×10^{-6}；铕异常十分显著，呈明显负异常(δ(Eu)=0.07~0.13)，δ(Eu)的平均值为 0.09，铈为弱负异常。

2) 辉绿岩：轻稀土元素段曲线较陡，重稀土段较缓，具右倾轻稀土富集型(图 1(b))，稀土总量∑w(REE)变化不大，在 137.27×10^{-6}~156.66×10^{-6} 之间，平均含量为 146.96×10^{-6}；铕具明显正异常(δ(Eu)=1.07~1.24)，铈为弱负异常。

3.2　变质地层稀土元素分布模式

1) 大理岩：各样品稀土配分模式基本相似，轻稀土元素段曲线较陡，重稀土段近似平行曲线，属轻稀土富集型(见图 1(c))。稀土总量∑w(REE)在 7.84×10^{-6}~35.40×10^{-6} 之间，变化不大。除 D011-5 号样品可能由于矿物组合、岩性及热液活动的影响，铕呈弱正异常(δ(Eu)=1.12)外，其他样品铕(δ(Eu)=0.32~0.74)和铈(δ(Ce)=0.74~0.90)均为负异常型。

2)变质砂岩：轻稀土元素段曲线较陡，重稀土段较缓，属轻稀土富集型(见图 1(d))，稀土总量∑w(REE)变化较大，在 39.27×10^{-6}~290.71×10^{-6} 之间，平均含量为 178.54×10^{-6}。铕(δ(Eu)=0.50~0.71)和铈(δ(Ce)=0.80~0.89)均为负异常型。变质杂砂岩和变质黏土质

表 1 塔里亚布岛不同地质体稀土元素测试结果及部分样品的 Cu、Pb 和 Zn 含量

Table 1 REE contents and Cu、Pb and Zn data of different geologic bodies in Taliabu Island

标本号	岩性	$w/10^{-6}$																	
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Cu	Pb	Zn
ZK12301-B1	花岗岩	37.10	75.20	8.64	31.70	7.46	0.18	6.09	1.26	7.97	1.54	4.91	0.88	5.91	0.89	47.60	49	48	184
ZK12301-B2	黑云母钾长花岗岩	28.20	55.60	6.51	24.30	5.72	0.12	5.43	1.19	7.57	1.48	4.90	0.88	5.74	0.89	49.60	38	43	33
ZK12301-B5	花岗岩	22.00	45.10	5.51	21.80	5.89	0.15	5.07	1.24	8.15	1.64	5.38	0.94	6.32	0.92	50.40	19	30	21
ZK12301-B7	钾长花岗斑岩	29.00	57.50	6.85	25.90	6.42	0.17	5.42	1.15	6.87	1.30	4.13	0.72	4.84	0.71	40.10	36	47	28
ZK12303-B2	中粗粒钾长花岗岩	22.30	41.60	5.04	19.30	5.01	0.18	4.31	0.98	5.75	1.15	3.74	0.66	4.38	0.62	36.80	65	52	63
ZK12303-B4	花岗岩	23.50	46.80	5.79	22.60	6.12	0.11	5.34	1.20	7.63	1.57	5.24	0.92	6.11	0.90	50.30	24	33	432
ZK12303-B5	花岗岩	24.50	47.80	5.77	22.40	5.49	0.14	4.74	1.06	6.66	1.35	4.23	0.74	5.10	0.74	39.90	46	43	122
ZK12304-B3	黑云母钾长花岗岩	35.00	70.00	8.50	32.70	8.31	0.21	7.14	1.55	9.44	1.79	6.00	1.01	6.91	1.02	57.00	25	39	32
ZK12301-B6	辉绿玢岩	22.90	47.10	5.91	25.80	5.44	1.64	4.63	0.90	5.48	1.05	3.39	0.60	3.51	0.51	27.80	78	26	118
ZK12305-B7	辉长玢岩	22.60	45.60	5.75	25.10	4.82	1.67	4.01	0.62	3.67	0.62	1.92	0.28	1.83	0.28	18.50	84	19	108
ZK12302-B2	蛇纹石水镁石化大理岩	4.16	7.13	0.78	2.98	0.61	0.07	0.53	0.11	0.71	0.15	0.47	0.07	0.46	0.06	6.44	4	5	101
ZK12305-B6	蛇纹石水镁石化大理岩	6.28	11.00	1.14	4.55	0.83	0.13	0.90	0.16	0.90	0.17	0.54	0.08	0.53	0.08	8.12	25	10	93
D018-1	蛇纹石水镁石化大理岩	2.20	3.76	0.45	1.79	0.38	0.05	0.38	0.07	0.41	0.10	0.32	0.05	0.26	0.04	4.44	5	5	94
ZK12305-B1	蛇纹石化大理岩	6.46	12.90	1.25	4.62	0.86	0.19	0.85	0.14	0.85	0.15	0.47	0.07	0.44	0.06	5.57	21	7	122
ZK12302-B3	大理岩	3.32	5.74	0.64	2.34	0.54	0.05	0.47	0.09	0.67	0.13	0.48	0.07	0.45	0.05	6.38	2	8	222
ZK12305-B3	大理岩	4.07	7.70	0.79	3.06	0.60	0.11	0.57	0.10	0.53	0.12	0.38	0.05	0.30	0.04	4.44	9	8	30
ZK12305-B4	大理岩	3.56	6.42	0.66	2.65	0.48	0.10	0.43	0.08	0.48	0.10	0.27	0.04	0.26	0.03	3.33	25	17	37
D011-5	大理岩	1.47	2.44	0.26	0.94	0.20	0.07	0.18	0.04	0.21	0.04	0.13	0.02	0.10	0.02	1.73	1	3	36
D018-2	大理岩	2.24	3.77	0.46	1.82	0.41	0.06	0.38	0.07	0.41	0.08	0.26	0.04	0.24	0.03	3.86	1	3	143
D012-3	变质杂砂岩	39.10	77.70	9.44	36.70	7.11	1.26	5.88	1.05	5.97	1.12	3.50	0.58	3.90	0.58	31.90	22	17	65
D012-4	变质杂砂岩	38.60	77.70	9.60	38.30	6.96	1.08	5.86	1.14	6.89	1.38	4.55	0.76	5.10	0.73	39.60	21	21	81
ZK10601-B1	变质杂砂岩	45.20	88.40	11.20	45.70	9.57	1.63	7.81	1.37	7.63	1.37	4.45	0.70	4.39	0.67	41.30	22	20	120
D012-2	变质石英砂岩	14.60	29.90	3.38	12.80	2.56	0.42	2.15	0.38	2.34	0.43	1.47	0.23	1.47	0.22	13.10	21	19	36
D012-5	变质石英砂岩	6.29	13.10	1.40	5.50	1.09	0.15	0.90	0.18	1.18	0.23	0.84	0.13	0.91	0.13	7.23	12	18	21
D012-6	变质石英砂岩	21.60	43.30	5.14	19.70	3.84	0.61	3.21	0.56	3.39	0.62	1.98	0.30	1.94	0.30	16.60	20	9	50
D012-7	强硅化变质石英砂岩	24.50	52.10	6.27	25.10	4.99	1.01	4.31	0.77	4.59	0.85	2.63	0.44	2.90	0.46	23.50	24	16	58
D012-8	变质黏土质粉砂岩	46.80	97.00	11.50	47.40	9.54	1.62	8.33	1.45	8.30	1.59	4.89	0.78	5.01	0.80	45.70	31	15	97
ZK11206-B	金云母透辉石矽卡岩	5.82	16.80	2.75	15.10	4.17	0.39	3.99	0.68	3.90	0.75	2.23	0.31	1.73	0.23	24.70	26	58	490
D016-7	石榴子石绿帘石矽卡岩	67.90	118.0	14.00	51.30	10.20	1.48	8.84	1.38	7.43	1.29	3.75	0.56	3.35	0.51	42.30	9	7	245
D016-9	透辉石绿帘石矽卡岩	2.19	4.17	0.59	2.53	0.56	0.15	0.70	0.14	0.79	0.17	0.55	0.09	0.59	0.11	6.33	15	13	285
D016-2	透辉石透闪石矽卡岩	6.45	15.20	2.19	9.72	3.58	0.27	3.87	0.94	5.69	1.05	3.26	0.54	3.49	0.51	36.20	74	9	356
ZK13102-2	绿帘石化矽卡岩	8.79	18.60	2.10	8.30	1.73	0.16	1.58	0.27	1.50	0.28	0.89	0.15	0.94	0.15	10.30	14	6	343
ZK12301-B1	块状磁铁矿矿石	0.32	0.85	0.13	0.57	0.19	0.01	0.22	0.05	0.32	0.07	0.33	0.10	1.31	0.34	2.69			
ZK12301-B3	次块状磁铁矿矿石	1.10	3.76	0.65	3.77	1.53	0.02	1.63	0.36	2.16	0.45	1.77	0.61	8.08	2.00	17.00			
ZK12036-B2	斑杂状铜闪锌矿矿石	1.32	2.25	0.26	0.85	0.18	0.03	0.16	0.03	0.20	0.04	0.13	0.02	0.17	0.03	1.25			
ZK11201-B2	块状粗晶闪锌矿矿石	0.35	0.66	0.08	0.37	0.08	0.03	0.07	0.01	0.08	0.01	0.05	0.01	0.10	0.02	0.46			
WX-19	斑杂状铅锌矿矿石	0.98	1.92	0.21	0.80	0.24	0.05	0.22	0.05	0.30	0.06	0.21	0.04	0.28	0.05	1.98			
WX-1	浸染状磁黄铁矿磁铁矿矿石	2.26	5.76	0.87	4.60	1.22	0.10	1.15	0.22	1.30	0.25	0.70	0.10	0.60	0.09	7.97			
WX-8	条带状黄铁矿磁铁矿矿石	2.65	6.33	0.86	4.20	1.02	0.11	1.02	0.20	1.26	0.27	0.93	0.15	0.88	0.14	10.10			
WX-20	浸染状黄铁矿磁铁矿矿石	5.20	10.20	1.38	6.13	1.81	0.23	1.77	0.34	2.10	0.41	1.28	0.23	1.47	0.25	16.70			

表 2　塔里亚布岛稀土元素地球化学参数

Table 2　REE geochemical parameters of Taliabu Island

标本号	岩性	$\sum w(REE)/10^{-6}$	$w(LREE)/w(HREE)$	$\delta(Eu)$	$\delta(Ce)$	$(La/Yb)_N$	$(La/Sm)_N$	$(Gd/Yb)_N$	$w(La)/w(Sm)$	$w(Sm)/w(Nd)$	$w(Gd)/w(Y)$
ZK12301-B1	花岗岩	237.33	2.08	0.09	0.85	3.73	3.11	0.63	4.97	0.24	0.13
ZK12301-B2	黑云母钾长花岗岩	198.13	1.55	0.07	0.83	2.92	3.08	0.58	4.93	0.24	0.11
ZK12301-B5	花岗岩	180.51	1.25	0.09	0.84	2.07	2.33	0.49	3.74	0.27	0.10
ZK12301-B7	钾长花岗斑岩	191.08	1.93	0.09	0.83	3.56	2.82	0.69	4.52	0.25	0.14
ZK12303-B2	中粗粒钾长花岗岩	151.81	1.60	0.13	0.79	3.02	2.78	0.60	4.45	0.26	0.12
ZK12303-B4	花岗岩	184.13	1.32	0.07	0.82	2.28	2.40	0.54	3.84	0.27	0.11
ZK12303-B5	花岗岩	170.63	1.64	0.09	0.82	2.85	2.79	0.57	4.46	0.25	0.12
ZK12304-B3	黑云母钾长花岗岩	246.58	1.68	0.09	0.83	3.01	2.63	0.63	4.21	0.25	0.13
	平均值	195.02	1.63	0.09	0.83	2.93	2.74	0.59	4.39	0.25	0.12
ZK12301-B6	辉绿玢岩	156.66	2.27	1.07	0.83	3.87	2.63	0.81	4.21	0.21	0.17
ZK12305-B7	辉长玢岩	137.27	3.33	1.24	0.82	7.33	2.93	1.34	4.69	0.19	0.22
	平均值	146.96	2.80	1.15	0.82	5.60	2.78	1.08	4.45	0.20	0.19
ZK12302-B2	蛇纹石水镁石化大理岩	24.72	1.75	0.40	0.78	5.43	4.27	0.72	6.83	0.20	0.08
ZK12305-B6	蛇纹石水镁石化大理岩	35.40	2.08	0.51	0.80	7.09	4.76	1.05	7.61	0.18	0.11
D018-1	蛇纹石水镁石化大理岩	14.71	1.42	0.46	0.75	4.97	3.59	0.89	5.74	0.21	0.09
ZK12305-B1	蛇纹石化大理岩	34.87	3.06	0.73	0.90	8.76	4.72	1.19	7.55	0.19	0.15
ZK12302-B3	大理岩	21.42	1.43	0.32	0.78	4.36	3.86	0.64	6.18	0.23	0.07
ZK12305-B3	大理岩	22.87	2.50	0.65	0.85	8.06	4.25	1.17	6.81	0.20	0.13
ZK12305-B4	大理岩	18.87	2.77	0.74	0.82	8.07	4.67	0.99	7.48	0.18	0.13
D011-5	大理岩	7.84	2.19	1.12	0.77	8.82	4.55	1.13	7.28	0.21	0.11
D018-2	大理岩	14.12	1.63	0.49	0.74	5.66	3.40	0.98	5.44	0.23	0.10
	平均值	21.65	2.09	0.60	0.80	6.80	4.23	0.97	6.77	0.20	0.11
D012-3	变质杂砂岩	225.79	3.14	0.63	0.82	5.95	3.44	0.92	5.50	0.19	0.18
D012-4	变质杂砂岩	238.25	2.61	0.55	0.82	4.49	3.47	0.70	5.55	0.18	0.15
ZK10601-B1	变质杂砂岩	271.38	2.89	0.61	0.80	6.11	2.95	1.09	4.72	0.21	0.19
D012-2	变质石英砂岩	85.45	2.92	0.59	0.86	5.90	3.56	0.90	5.70	0.20	0.16
D012-5	变质石英砂岩	39.27	2.35	0.50	0.89	4.09	3.61	0.60	5.77	0.20	0.12
D012-6	变质石英砂岩	123.08	3.26	0.57	0.84	6.61	3.52	1.01	5.63	0.20	0.19
D012-7	强硅化变质石英砂岩	154.42	2.82	0.71	0.86	5.02	3.07	0.91	4.91	0.20	0.18
D012-8	变质黏土质粉砂岩	290.71	2.78	0.60	0.85	5.55	3.07	1.02	4.91	0.20	0.18
	平均值	178.54	2.85	0.59	0.84	5.47	3.33	0.90	5.34	0.20	0.17
ZK11206-B	金云母透辉石矽卡岩	83.55	1.17	0.32	0.87	2.00	0.87	1.41	1.40	0.28	0.16
D016-7	石榴子石绿帘石矽卡岩	332.28	3.79	0.51	0.76	12.04	4.16	1.62	6.66	0.20	0.21
D016-9	透辉石绿帘石矽卡岩	19.64	1.08	0.79	0.76	2.22	2.45	0.73	3.92	0.22	0.11
D016-2	透辉石透闪石矽卡岩	92.96	0.67	0.24	0.84	1.10	1.13	0.68	1.80	0.37	0.11
ZK13102-2	绿帘石化矽卡岩	55.74	2.47	0.32	0.88	5.56	3.18	1.03	5.08	0.21	0.15
	平均值	116.83	1.84	0.43	0.82	4.58	2.36	1.09	3.77	0.26	0.15
ZK12301-B1	块状磁铁矿矿石	7.50	0.38	0.13	0.87	0.14	1.01	0.10	1.62	0.34	0.08
ZK12301-B3	次块状磁铁矿矿石	44.89	0.32	0.04	0.90	0.08	0.45	0.12	0.72	0.41	0.10
	平均值	26.19	0.35	0.09	0.89	0.11	0.73	0.11	1.17	0.37	0.09
ZK12036-B2	斑杂状铜闪锌矿矿石	6.92	2.42	0.64	0.76	4.50	4.58	0.56	7.33	0.21	0.13
ZK11201-B2	块状粗晶闪锌矿矿石	2.37	1.93	1.31	0.81	2.11	2.88	0.41	4.60	0.20	0.14
WX-19	斑杂状铅锌矿矿石	7.40	1.32	0.72	0.84	2.11	2.52	0.50	4.03	0.31	0.11
	平均值	5.56	1.89	0.89	0.81	2.91	3.33	0.49	5.32	0.24	0.13
WX-1	浸染状磁黄铁矿磁铁矿矿石	27.18	1.20	0.27	0.86	2.25	1.16	1.18	1.85	0.27	0.14
WX-8	条带状黄铁矿磁铁矿矿石	30.11	1.01	0.34	0.87	1.80	1.62	0.71	2.60	0.24	0.10
WX-20	浸染状黄铁矿磁铁矿矿石	49.50	1.02	0.43	0.78	2.10	1.80	0.74	2.87	0.30	0.11
	平均值	35.60	1.08	0.35	0.84	2.05	1.53	0.88	2.44	0.27	0.12

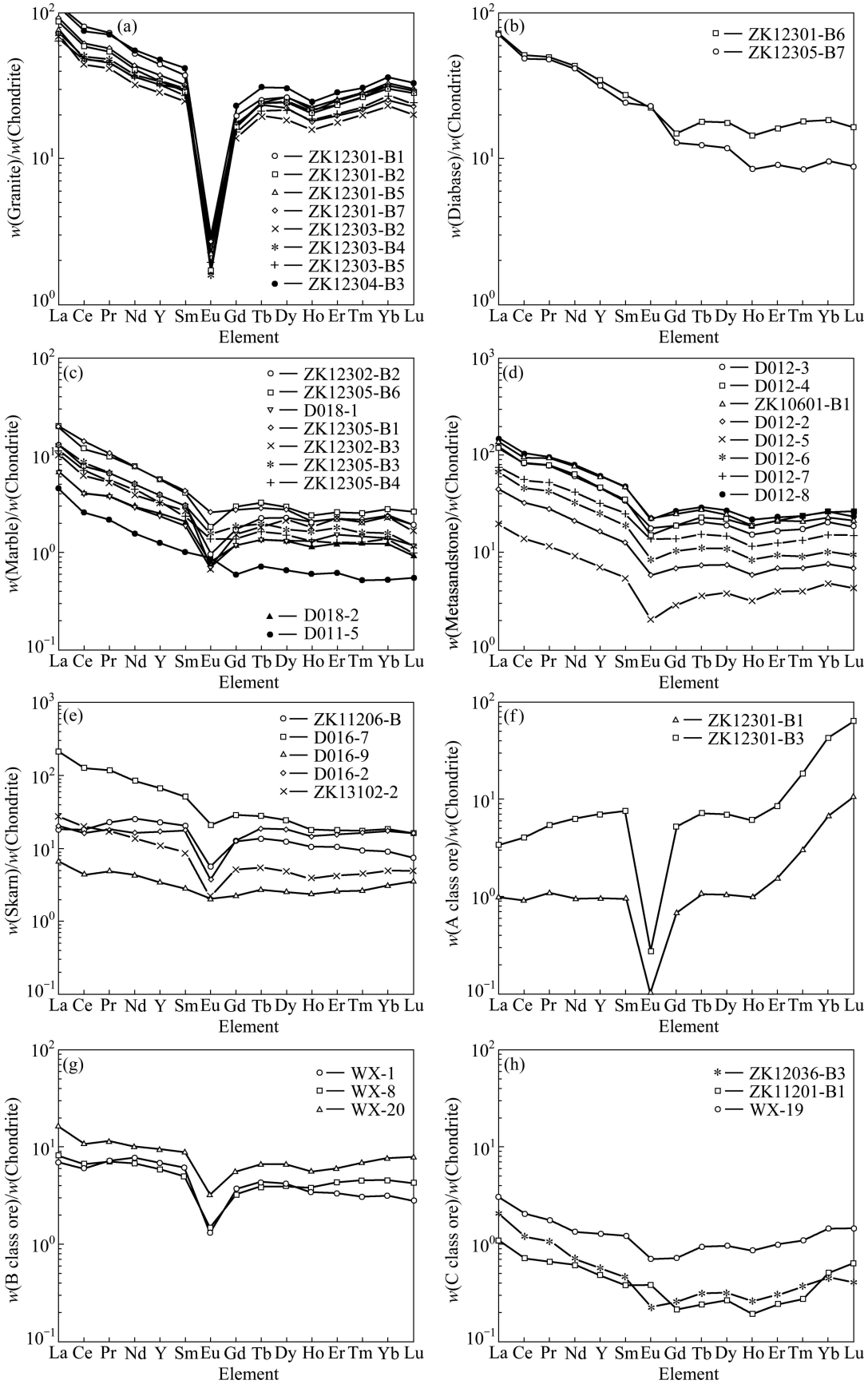

图 1 各地质体稀土元素球粒陨石标准化分布模式

Fig. 1 Chondrite-normalized REE distribution patterns of different geologic bodies: (a) Granite; (b) Diabase; (c) Marble; (d) Metasandstone; (e) Skarn; (f) A class ore; (g) B class ore; (h) C class ore

粉砂岩样品总稀土含量较高，∑w(REE)在 225.79×10^{-6}~290.71×10^{-6} 之间，主要是由于含有富集稀土元素的黏土质杂砂岩引起；变质石英砂岩和强硅化变质石英砂岩样品由于热液的参与，砂岩硅化变质，带走了部分稀土元素，致使石英含量增高，总稀土含量较低，∑w(REE)在 39.27×10^{-6}~154.42×10^{-6} 之间。

3.3　矽卡岩稀土元素分布模式

除 D016-2 和 ZK11206-B 样品的轻稀土元素段曲线较缓外，其他样品的轻稀土元素段曲线较陡，重稀土段均表现为近似平行的曲线(见图 1(e))。稀土总量∑w(REE)变化较大，在 19.64×10^{-6}~332.28×10^{-6} 之间，平均含量为 116.84×10^{-6}，其中 D016-7 样品(∑w(REE)=332.28×10^{-6})由石榴子石富集稀土能力强所致。具富集轻稀土分布模式(w(LREE)/w(HREE)在 0.67~3.79 之间，$(La/Yb)_N$ 为 1.10~12.04＞1)，铕(δ(Eu)=0.24~0.79)和铈(δ(Ce)=0.76~0.88)均为负异常型。

3.4　矿石稀土元素分布模式

根据各矿石稀土元素特征，将 ZK12301-B1 和 ZK12301-B3 样品归为 A 类磁铁矿矿石，WX-1、WX-8 和 WX-20 样品归为 B 类磁铁矿矿石，ZK11201-B2、ZK12036-B3 和 WX-19 样品归为 C 类铜锌硫化物矿石。

1) A 类磁铁矿矿石：各样品稀土配分型式基本相似，轻稀土元素段曲线较缓，重稀土段较陡(见图 1(f))，具左倾重稀土富集型分布模式(w(LREE)/w(HREE)范围在 0.32~0.38 之间，$(La/Yb)_N$ 为 0.08~0.14＜1)，稀土总量∑w(REE)较低，在 7.50×10^{-6}~44.89×10^{-6} 之间，铕异常十分显著，呈明显负异常(δ(Eu)=0.04~0.13)，铈具弱负异常(δ(Ce)=0.87~0.90)。

2) B 类磁铁矿矿石：稀土元素轻重稀土段均为近似水平曲线(图 1(g))，具弱轻稀土富集型(w(LREE)/w(HREE)在 1.01~1.20 之间，$(La/Yb)_N$ 为 1.80~2.25＞1)，稀土总量∑w(REE)较低，在 27.18×10^{-6}~49.50×10^{-6} 之间，铕呈负异常(δ(Eu)=0.27~0.43)，铈具弱负异常(δ(Ce)=0.87~0.78)。

3) C 类铜锌硫化物矿石：稀土元素曲线较缓，轻稀土元素段曲线较陡，重稀土段较缓(见图 1(h))，具弱轻稀土富集型(w(LREE)/w(HREE)在 1.32~2.42 之间，$(La/Yb)_N$ 为 2.11~4.50＞1)，稀土总量∑w(REE)较低，在 2.37×10^{-6}~7.40×10^{-6} 之间，铕异常不明显(δ(Eu)= 0.64~1.31)，铈具弱负异常(δ(Ce)=0.76~0.84)。

4　稀土元素特征参数变化特点

稀土元素参数 w(LREE)/w(HREE)、w(La)/w(Sm)、w(Sm)/w(Nd)和 w(Gd)/w(Y)均反映了轻重稀土间的分馏程度及与铁多金属间的矿化关系，而 δ(Eu)和 δ(Ce)反映稀土分馏的过程[2]，稀土微量元素比值图则反映物质来源[12]。从稀土元素地球化学参数图(见图 2)中可以看出，岩浆岩与变质地层的稀土参数互不影响，A 类磁铁矿矿石与其他地质体差异较大，主要分布在参数图的左上或左下部，明显与其他地质体(矿体)分离，轻、重稀土分馏程度(平均$(La/Sm)_N$=0.73，平均$(Gd/Yb)_N$=0.11)亦远小于其他地质体(矿体)的，属弱分馏型，继承或保存了含矿岩浆的铕异常(与花岗岩 δ(Eu)平均值相同，均为 0.09，铕异常远大于其他地质体)，由 w(Sm)/w(Nd)=0.34~0.41＞0.3(其他地质体的均小于 0.3 的)，表明成矿物质主要来源于深部岩浆[13]，与其他地质体无关；矽卡岩投影于花岗岩、大理岩和变质砂岩区域，明显受花岗岩、大理岩和变质砂岩共同作用的影响[14]；B 类磁铁矿矿石和 C 类铜锌硫化物矿石均投影于矽卡岩区域，与矽卡岩具有紧密的成因关系，不同的是，B 类磁铁矿属中等分馏型(平均$(La/Sm)_N$=1.53、平均$(Gd/Yb)_N$=0.88)；C 类铜锌硫化物矿石属强分馏型(平均$(La/Sm)_N$=3.33、平均$(Gd/Yb)_N$=0.49)，由此说明，B 类磁铁矿矿石和 C 类铜锌硫化物矿石受岩浆热液和变质地层共同作用的影响。此外，w(La)/w(Sm)—w(Sm)/w(Nd)和 w(Nd)—w(La)图解中，除辉绿岩明显偏离外，各地质体及各类矿石呈明显线性相关排列，说明花岗岩、大理岩、变质砂岩、矽卡岩及各类矿石属同一成矿系统的组成部分。

5　讨论

5.1　成矿系统的厘定

花岗岩稀土配分模式中，稀土总量接近世界花岗岩平均值，w(Sm)/w(Nd)＜0.3，表明花岗岩源于地壳[15]。随重熔与分异作用的加深，负铕异常逐渐增强，研究区花岗岩稀土配分模式中铕异常十分显著，δ(Eu)平均值为 0.09，表明曾经历明显的斜长石分离结晶作用，因此，具备壳源花岗岩的负铕异常特征，同时表明其经历了高度的分异演化，氧化作用较强。研究区花岗岩的稀土元素地球化学特征及其配分模式均表明其具 S 型花岗岩的典型特征，属壳源重熔型。

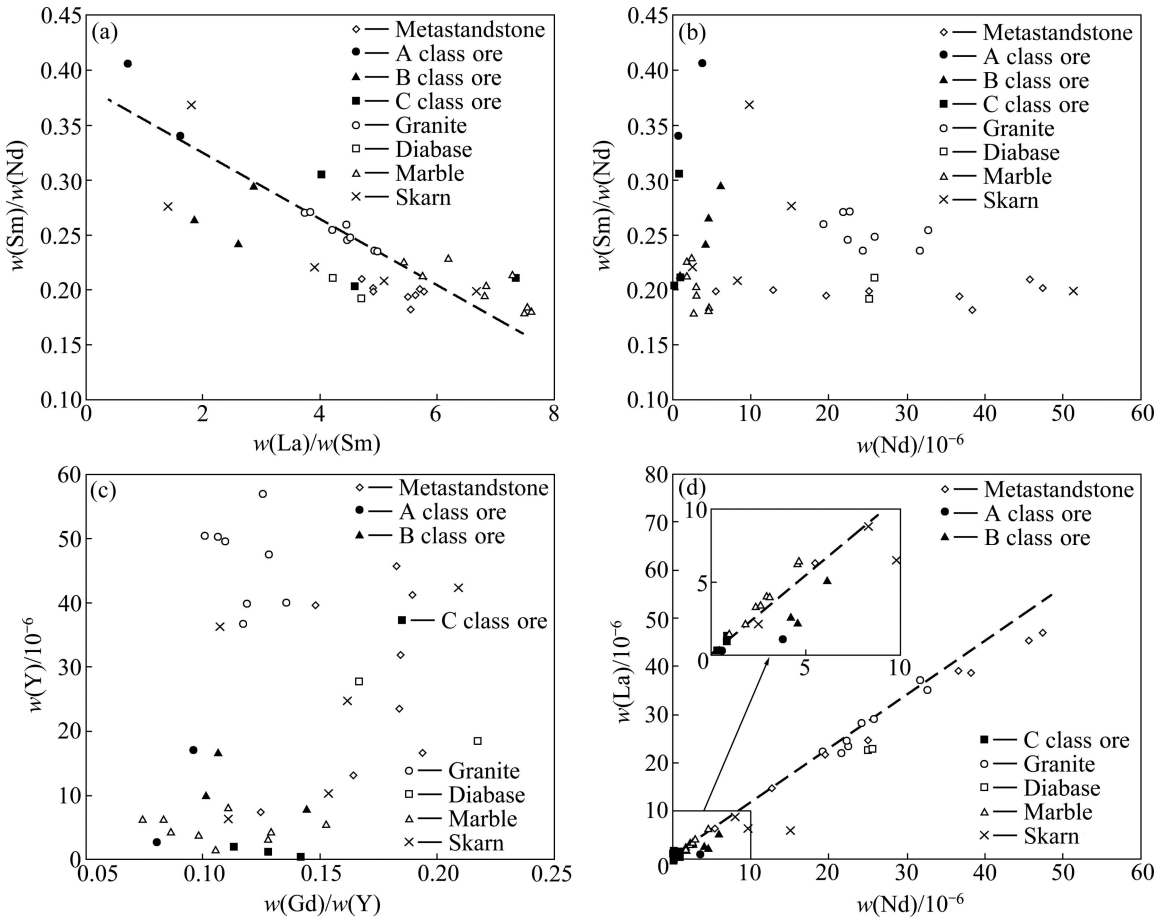

图 2 各地质体稀土元素地球化学参数

Fig. 2 REE geochemical parameters of different geologic bodies: (a) w(Sm)/w(Nd)—w(La)/w(Sm); (b) w(Sm)/w(Nd)—w(Nd); (c) w(Y)—w(Gd)/w(Y); (d) w(La)—w(Nd)

辉绿岩与花岗岩的稀土配分模式明显不同，花岗岩具有明显铕负异常，而辉绿岩为铕正异常(δ(Eu)=1.07~1.24)，显示花岗岩与辉绿岩属不同的成因来源和不同期次的产物。A 类磁铁矿矿石、B 类磁铁矿矿石和 C 类铜锌硫化物矿石稀土模式与花岗岩稀土特征相似，得出铁多金属矿化与花岗岩联系紧密，与辉绿岩无关，即辉绿岩不是铁多金属成矿系统的构成部分。

A 类磁铁矿矿石具有左倾重稀土富集型分布模式(不同于其他地质体具有轻稀土富集型)特征，铕异常十分明显，与花岗岩的 δ(Eu)平均值相同，均为 0.09，远远大于其他地质体的；稀土元素特征参数主要分布在参数图的左上或左下部，明显与其他地质体(矿体)分离，由 w(Sm)/w(Nd)=0.34~0.41＞0.3(其他地质体的均小于 0.3)可知，其物质来源主要由深部岩浆提供，与其他地质体无关。根据产出分布特征、矿石组构和矿物共生组合关系，此类矿石由基本无硫化物的致密块状、条带块状、熔接瘤状磁铁矿及极少量磷灰石和萤石等构成。限见于紧贴接触界面的岩体产状急剧变化部位、石英细砂岩与泥质粉砂岩等软硬岩层层间，远离接触界面即以复杂边界尖灭或楔状尖灭，是含铁花岗质岩浆结晶分异晚期的残余岩浆与不混熔的磁铁矿矿浆分离后，磁铁矿矿浆沿较开阔的接触界面裂隙、软硬岩石层间界面裂隙及岩体边部冷凝收缩裂隙贯入而成的，属矿浆型磁铁矿矿石。因此，矿浆型磁铁矿属于塔里阿布岛铁多金属成矿系统的一个相对独立的子系统，即印支期花岗岩结晶分异成矿系统。

矽卡岩的 REE 分布模式受岩体、碳酸盐和流体的控制[16]，由于花岗岩平均稀土总量(195.02×10^{-6})比大理岩的(21.65×10^{-6})大一个数量级，因而矽卡岩的 REE 分布模式除 REE 总量降低外，承袭了花岗岩的富集轻稀土和负 Eu 异常的 REE 模式特征，因此，本区矽卡岩主要体现了交代成因矽卡岩的特征[17]。矽卡岩稀土特征参数投影于花岗岩、大理岩和变质砂岩区域，明显受花岗岩、大理岩和变质砂岩共同作用的影响。是尚未固结的硅酸盐岩浆与碳酸盐岩或钙质粉砂岩类接触时，在适当的深度范围内，发生交代作用形成的。

B 类磁铁矿矿石和 C 类铜锌硫化物矿石与花岗岩具有相似的稀土配分曲线形态，均具轻稀土富集特征，其稀土元素特征参数均投影于矽卡岩区域，与矽卡岩具有紧密的成因关系。不同的是，B 类磁铁矿矿石稀土元素具铕负异常和中等分馏型特征；C 类铜锌硫化物矿石铕基本无异常，属强分馏型。根据产出分布特征、矿石组构和矿物共生组合关系，B 类磁铁矿矿石产在外接触带的矽卡岩化钙镁碳酸盐岩及含钙质变质砂岩地层及紧贴接触界面的内接触带矽卡岩化部位，矿化随矽卡岩化消失而逐渐消失，是晚期随气化流体在接触界面附近沿化学性状活泼地层层位及裂隙空间富集形成的接触交代型磁铁矿矿体，属气成氧化物阶段；C 类铜锌硫化物矿石出现在磁铁矿矿体内部、矽卡岩化或热液蚀变明显的浅变质碎屑岩、大理岩、变质泥质粉砂岩层间破碎带及大理岩内部，是岩浆期后(矽卡岩期后)热液沿构造裂隙(包括接触交代型、矿浆型磁铁矿矿体内部裂隙)、层间界面及其旁侧围岩充填交代成矿的产物，属硫化物阶段。综上所述，B 类磁铁矿矿石和 C 类铜锌硫化物矿石分别是接触交代矿床的不同成矿阶段的产物，明显受花岗岩、大理岩和变质砂岩共同作用的影响，同属塔里阿布岛铁多金属成矿系统的一个子系统，即接触交代成矿系统。

以上讨论表明：辉绿岩不是铁多金属成矿系统的构成部分；矿浆型磁铁矿物质来源主要由深部岩浆提供，与其他地质体无关，属于塔里阿布岛铁多金属成矿系统的一个相对独立的子系统，即印支期花岗岩结晶分异成矿系统；接触交代型磁铁矿矿石和热液充填交代型铜锌硫化物矿石同属塔里阿布岛铁多金属成矿系统的一个子系统；两个成矿子系统是一个从岩浆阶段至热液阶段完整的成矿系统，是同一成矿系统在不同矿化期成矿的产物。

5.2　物质来源

矿浆型磁铁矿与花岗岩具有相同的铕异常(δ(Eu)平均值均为 0.09)，远远大于其他地质体的，在稀土元素特征参数图中明显与其他地质体(矿体)分离，由 w(Sm)/w(Nd)=0.34~0.41＞0.3 可知，其物质来源主要由深部岩浆提供，与其他地质体无关。

根据表 1 中 Cu、Pb 和 Zn 的含量与稀土元素特征参数得到 w(LREE)/w(HREE)和$(La/Yb)_N$与 Cu、Pb 和 Zn 的相关图(见图 3)。从图中可以看出，花岗岩和变质地层与 Cu、Pb 和 Zn 的相关度呈明显分离趋势，花岗岩中，Cu、Pb 和 Zn 含量普遍较高，主要分布在相关图的左上部区域，而变质地层主要分布在右下部区域；矽卡岩在岩体和变质地层区域均有分布，但主要分布在花岗岩的左上部区域。因此，矽卡岩的物质主要来自岩浆热液，部分来自热液流经的围岩。

接触交代型矿石和热液充填交代型矿石分属接触交代矿床的气成氧化物阶段和硫化物阶段，与矽卡岩具有紧密关系。接触交代型矿石和热液充填交代型矿石与花岗岩、矽卡岩具有相似的稀土配分曲线形态，均具轻稀土富集特征；结合稀土元素特征参数图(见图 2)，接触交代型矿石和热液充填交代型矿石均投影于花岗岩、大理岩和变质砂岩区域，不同的是，接触交代型矿石以花岗岩为主，热液充填交代型矿石以大理岩为主，表明接触交代型矿石和热液充填交代型矿石物质来源主要来自岩浆热液，部分来自热液流经的围岩，而热液充填交代型受围岩影响较大。

对该矿床选取金云母、透闪石、磁铁矿、阳起石和方解石等单矿物进行 C、O 和 H 同位素研究，结果亦表明，矿浆型和矽卡岩型磁铁矿中流体的 $\delta(^{18}O)$值均位于原生岩浆水范围内(6~10 mg/g)[1,18]，说明这两种成因类型的成矿流体均源自岩浆热液。而热液型流体的 $\delta(^{18}O)$值小于 5 mg/g，不完全来自岩浆热液，而是在后期叠加改造中产生了交换。

5.3　稀土元素在成矿系统中的叠加和演化规律

一般情况，在同一成矿热液演化过程中结晶矿物的稀土元素总有相似性，并不因为不同的矿物而出现很大的选择性，其稀土元素取决于沉淀时成矿溶液的稀土元素特征及成矿环境[19]。各地质体 REE 分布模式具有一定的相似性，除辉绿岩外，各地质体均具 Eu 负异常和弱 Ce 负异常，总体上花岗岩、大理岩和变质砂岩的稀土含量较稳定，波动较小，反映了岩体和围岩固有的稀土元素特征，而矽卡岩和矿石由于物质来源、成矿作用阶段及成矿系统各组成部分相互叠加作用不同，其稀土含量波动较大。

矿浆型磁铁矿物质主要来源于深部岩浆，与其他地质体无关，是一个相对独立的结晶分异成矿子系统，反映了从岩浆型花岗岩到矿浆型磁铁矿，稀土总量急剧下降，继承或保存了含矿岩浆的铕异常、由轻稀土富集型转变为重稀土富集的演化特征。

接触交代型矿石和热液充填交代型矿石分属接触交代矿床的气成氧化物阶段和硫化物阶段，与矽卡岩具有紧密关系，同属塔里阿布岛铁多金属成矿系统的一个子系统。矽卡岩是岩体和围岩相互叠加作用的结果，从花岗岩到矽卡岩除稀土总量降低外，承袭了花岗岩的富集轻稀土和负铕异常，兼具大理岩分布特征。气成氧化物阶段和硫化物阶段是叠加在矽卡岩上的不同成矿阶段，从矽卡岩到气成氧化物阶段再到硫

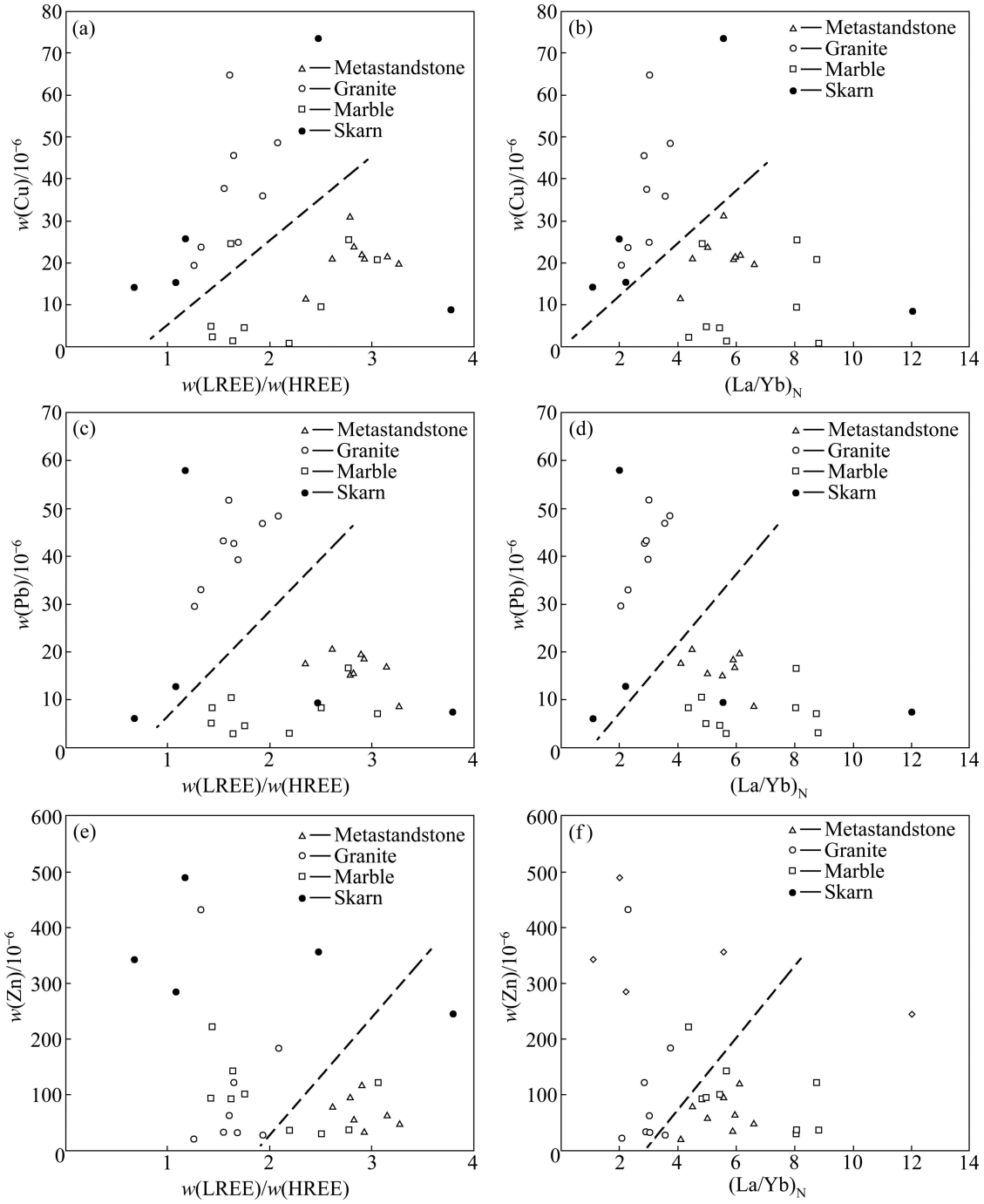

图 3 Cu、Pb 和 Zn 与稀土元素参数的相关图

Fig. 3 Correlograms of Cu, Pb, Zn and REE: (a) w(Cu)—w(LREE)/w(HREE); (b) w(Cu)—$(La/Yb)_N$; (c) w(Pb)—w(LREE)/w(HREE); (d) w(Pb)—$(La/Yb)_N$; (e) w(Zn)—w(LREE)/w(HREE); (f) w(Zn)—$(La/Yb)_N$

化物阶段是一个相对独立的演化过程，从矽卡岩到接触交代型再到热液充填交代型，稀土总量逐渐降低，分馏程度逐渐增强。

Eu 是稀土元素中具有重要意义的变价元素，在还原条件下 Eu^{3+}可以被还原为 Eu^{2+}，Eu^{3+}/Eu^{2+}的氧化还原电位随温度的增加急剧增大，随 pH 增大而有轻微增加，压力的变化影响很小[20−21]。塔里阿布岛铁多金属矿床成矿流体铕异常变化较大，除少数 Eu 异常不明显外，其余均为负值，即成矿热液流体具有负铕异常。矿浆型阶段 δ(Eu)=0.04~0.13(平均值为 0.09)，矽卡岩阶段 δ(Eu)=0.24~0.79(平均值为 0.43)，气成氧化物阶段 δ(Eu)=0.27~0.43(平均值为 0.35)，硫化物阶段 δ(Eu)=0.64~1.31(平均值为 0.89)。总体上，铕异常的变化反映成矿从早期到晚期，铕异常逐渐减弱，成矿环

境由氧化向还原的逐渐转化，其中硫化物阶段还原性最强。与丁俊等[1]选取金云母、透闪石、阳起石、磁铁矿和重晶石进行的流体包裹体群体气液相成分分析结果一致。矿石的岩相学观察研究亦表明，矿浆型阶段和矽卡岩化阶段发育磁铁矿，而至硫化物阶段发育闪锌矿，也显示成矿环境由氧化向还原转化。

同一成矿系统不同成矿类型的稀土特征出现这种规律的原因可能主要受自身富集稀土元素的强度、成矿物质或成矿元素来源、成矿系统各组成部分相互叠加作用不同、流体含矿性、运移分配及成矿的物理化学条件的影响。

6　结论

1) 稀土元素地球化学在厘定复杂类型地质体及矿体的成矿系统、分析矿床成因方面，是一个行之有效的方法。

2) 各地质体的 REE 分布模式具有一定的相似性，除辉绿岩属不同的成因来源和不同期次的产物外，均具清晰的 Eu 负异常和弱 Ce 负异常，认为花岗岩属壳源重熔 S 型。

3) 辉绿岩不是铁多金属成矿系统的构成部分；矿浆型磁铁矿属于塔里阿布岛铁多金属成矿系统的一个相对独立的子系统，即印支期花岗岩结晶分异成矿系统；接触交代型磁铁矿矿石和热液充填交代型铜锌硫化物矿石同属塔里阿布岛铁多金属成矿系统的一个子系统，即接触交代成矿系统；两个成矿子系统是一个从岩浆阶段至热液阶段完整的成矿系统，是同一成矿系统在不同矿化期成矿的产物。

4) 矿浆型磁铁矿主要来源于深部岩浆，接触交代型磁铁矿矿石和热液充填交代型铜锌硫化物矿石主要来源于岩浆热液，部分来源于变质地层。

5) 在成矿作用过程中，同一成矿系统不同成矿类型稀土特征呈规律性变化，矿浆型阶段—矽卡岩化阶段—气成氧化物阶段—硫化物阶段，稀土分馏程度逐渐增强，铕异常逐渐减弱，这些演化特征说明成矿环境从早期的相对氧化环境向晚期的相对还原环境的转化；矿浆型阶段为重稀土富集型，矽卡岩期为轻稀土弱富集型。

REFERENCES

[1] 丁　俊, 张术根, 徐忠发, 秦新龙. 印度尼西亚塔里亚布岛锡铁多金属矿床的地质地球化学特征与成因[J]. 地球学报, 2011, 32(3): 313−321.
DING Jun, ZHANG Shu-gen, XU Zhong-fa, QIN Xin-long. Geological and geochemical characteristics and genesis of the Sn-Fe polymetallic deposit in Taliabu island, Indonesia [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2011, 32(3): 313−321.

[2] 张术根, 李桂秀, 石得凤, 韩世礼. 宁镇地区燕山期矽卡岩矿床成矿系统稀土元素地球化学研究[J]. 中国稀土学报, 2010, 28(5): 626−636.
ZHANG Shu-gen, LI Gui-xiu, SHI De-feng, HAN Shi-li. REE geochemistry of Yanshanian ore-forming system in Ningzhen skarn deposit area [J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2010, 28(5): 626−636.

[3] SVERJENSKY D A. Europium redox equilibrium in aqueous solutions [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1984, 67(1): 70−78.

[4] HANSON G N. Rare earth elements in petrogenetic studies of igneous systems [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1980, 8: 371−406.

[5] BAU M. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium [J]. Chemical Geology, 1991, 93(3/4): 219−230.

[6] HU Gong-ren, LIU Cong-qiang, YU Rui-lian. REE geochemistry of the Zhoutan Group metasedimentary rocks in central Jiangxi Province, Southeast China [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2008, 28(2): 154−162.

[7] JIANG Shao-yong, YU Ji-min, LU Jian-jun. Trace and rare-earth element geochemistry in tourmaline and cassiterite from the Yunlong tin deposit, Yunnan, China: Implication for migmatitic–hydrothermal fluid evolution and ore genesis [J]. Chemical Geology, 2004, 209(3/4): 193−213.

[8] MICHARD A. Rare earth element systematics in hydrothermal fluids [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989, 53(3): 745−750.

[9] ROY P D, SMYKATZ-KLOSS W. REE geochemistry of the recent playa sediments from the Thar Desert, India: An implication to playa sediment provenance [J]. Chemie der Erde-Geochemistry, 2007, 67(1): 55−68.

[10] ALI J R, HALL R. Evolution of the boundary between the Philippine Sea Plate and Australia: Palaeomagnetic evidence from eastern Indonesia [J]. Tectonophysics, 1995, 251(1/4): 251−275.

[11] 陈国达. 亚洲陆海壳体大地构造[M]. 长沙: 湖南教育出版社, 1998: 288−300.
CHEN Guo-da. Crustobody geotectonics of Asian continent and adjacent seas [M]. Changsha: Hunan Education Press, 1998: 288−300.

[12] 李闫华, 鄢云飞, 谭　俊, 李　飞. 稀土元素在矿床学研究中的应用[J]. 地质找矿论丛, 2007, 22(4): 294−298.
LI Yan-hua, YAN Yun-fei, TAN Jun, LI Fei. The application of

rare earth elements in research of ore deposits [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2007, 22(4): 294−298.

[13] CHEN Bai-lin, WU Gang-guo, ZHANG Da, HUANG Ren-sheng, WU Jian-she. Study on mineralization age of Xiaoban gold deposit, Fujian Province [J]. Journal of China University of Geosciences, 2002, 13(3): 225−233.

[14] CHEN Shi-zhong, ZHOU Ji-yuan, GU Lian-xing, CUI Bing-fang, XIAO Hui-liang. Characteristics of magmatic rocks and tectonic setting of Mazhuangshan Area, East Tianshan, China [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2000, 19(3): 261−266.

[15] YUAN Feng, ZHOU Tao-fa, LIU Xiao-dong, YUE Shu-cang. Geochemistry of rare earth elements of Anqing copper deposit in Anhui Province [J]. Journal of Rare Earths, 2002, 20(3): 223−227.

[16] 杨富全, 毛景文, 徐林刚, 张 岩, 刘 锋, 黄成林, 周 刚, 刘国仁, 代军治. 新疆蒙库铁矿床稀土元素地球化学及对铁成矿作用的指示[J]. 岩石学报, 2007, 23(10): 2443−2456.
YANG Fu-quan, MAO Jing-wen, XU Lin-gang, ZHANG Yan, LIU Feng, HUANG Cheng-lin, ZHOU Gang, LIU Guo-ren, DAI Jun-zhi. REE geochemistry of the Mengku iron deposit, Xinjiang, and its indication for iron mineralization [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(10): 2443−2456.

[17] 赵 斌, 赵劲松, 刘海臣. 长江中下游地区若干 Cu(AU)、CuFe(Au)和Fe矿床中钙质矽卡岩的稀土元素地球化学[J]. 地球化学, 1999, 28(2): 113−125.
ZHAO Bin, ZHAO JIN-song, LIU Hai-chen. REE geochemical studies of whole rock and rock-forming minerals in skarns from Cu(Au), Cu-Fe(Au) and Fe ore deposits distributed along middle-lower reaches of Yangtze River, China [J]. Geochimica, 1999, 28(2): 113−125.

[18] 蒋少涌, 赵葵东, 姜耀辉, 凌洪飞, 倪 培. 华南与花岗岩有关的一种新类型的锡成矿作用: 矿物化学、元素和同位素地球化学证据[J]. 岩石学报, 2006, 22(10): 2509−2516.
JIANG Shao-yong, ZHAO Kui-dong, JIANG Yao-hui, LING Hong-fei, NI Pei. New type of tin mineralization related to granite in South China: Evidence from mineral chemistry, element and isotope geochemistry [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(10): 2509−2516.

[19] 胡云沪, 陈远荣, 孙 芹. 黑龙江乌拉嘎金矿田不同地质体稀土元素特征及其地质意义[J]. 矿物学报, 2010, 30(3): 373−378.
HU Yun-hu, CHEN Yuan-rong, SUN Qin. Geochemical characteristics and significance of REE in different geological bodies in Wulaga gold deposit, Heilongjiang Province, China [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2010, 30(3): 373−378.

[20] SVERJENSKY D A. Prediction of Gibbs free energies of calcite-type carbonates and the equilibrium distribution of trace elements between carbonates and aqueous solutions [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1984, 48(5): 1127−1134.

[21] 徐晓春, 陆三明, 谢巧勤, 楼金伟, 褚平利. 安徽铜陵冬瓜山铜金矿床流体包裹体微量元素地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2008, 24(8): 1865−1874.
XU Xiao-chun, LU San-ming, XIE Qiao-qin, LOU Jin-wei, CHU Ping-li. Trace element geochemical characteristics of fluid inclusions of Dongguashan ore deposit in Tongling, Anhui Province, and their geological implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(8): 1865−1874.

(编辑 陈卫萍)