

邹灏, 方乙, 陈合毛, 等. 浙江天台盆地陈萤石矿稀土元素地球化学特征及成因[J]. 中国地质, 2014, 41(4): 1375-1386.

Zou Hao, Fang Yi, Chen Hemao, et al. REE geochemistry and genesis of the Xiachen fluorite deposit in Tiantai basin, Zhejiang Province[J]. Geology in China, 2014, 41(4): 1375-1386(in Chinese with English abstract).

# 浙江天台盆地陈萤石矿 稀土元素地球化学特征及成因

邹灏<sup>1</sup> 方乙<sup>2</sup> 陈合毛<sup>1</sup> 肖广<sup>1</sup> 徐旃章<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 2. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500)

**摘要:**为了探讨浙江天台盆地陈萤石矿床的成矿机理、成矿物质来源与演化,对其地质背景、微量和稀土元素地球化学特征进行了研究。研究结果表明:天台盆地陈萤石矿中围岩的稀土总量、轻稀土、中稀土和重稀土的含量远高于矿石。萤石、石英和围岩的稀土元素特征均为轻稀土相对富集,重稀土显示相对亏损,  $(La/Yb)_N$  通常多数大于8,配分曲线显示较陡的右倾斜。萤石的Eu均呈弱正异常,而石英则呈现弱的Eu负异常,萤石和石英的Ce基本不显异常。根据La/Ho-Y/Ho关系图,该成矿带上萤石的成矿物质是同源的,且萤石与石英为同期形成的产物。天台盆地陈萤石矿的成矿物质Ca元素可能主要来自朝川组紫红色沉积岩,F的来源除了朝川组地层以外,陈蔡群变质岩系也应是F的主要来源之一。根据矿床地质特征及其Tb/Ca-Tb/La关系图可知,其为低温热液成因——断裂带充填交代型矿床。

**关键词:**浙江天台盆地;下陈萤石矿;微量元素;稀土元素;地球化学特征

**中图分类号:** P619.21<sup>+</sup>5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2014)04-1375-12

浙江是中国萤石矿的主要产地,其萤石资源以量大、质优而闻名于国内外。微量元素和稀土元素的地球化学研究是岩浆和成矿作用过程中物理化学条件变化、成矿流体演化和运移、流体的水岩反应等成矿作用和过程的一种有效的示踪方法<sup>[1-10]</sup>。通过对萤石的稀土元素地球化学特征的研究,揭示成矿物质来源、成矿流体的性质和矿床成因具有十分重要的意义<sup>[11-19]</sup>。从前人的资料和文献来看,迄今为止,有关浙江天台盆地陈萤石矿床的稀土元素地球化学和矿床成因方面的研究甚微。因此,本文试图通过研究天台盆地陈萤石的稀土元素地

球化学特征,来揭示萤石成矿物质来源、成矿物理化学条件和矿床成因,为在浙东南地区寻找成因类似的同类矿床提供理论依据。

## 1 地质概况

研究区在大地构造位置上属于华南褶皱系浙东南褶皱带温州—临海拗陷,黄岩—象山断拗内的天台盆地北西边缘,其北西和南东两侧各以江山—绍兴深断裂及宁波—丽水深断裂为界(图1-a、b)。

区内出露的地层有上侏罗统大夹组( $J_3d$ )砾岩、砂岩夹酸性火山碎屑岩,上侏罗统高坞组( $J_3g$ )中酸

收稿日期:2013-05-19; 改回日期:2013-10-23

基金项目:资源勘查工程专业教育部卓越工程师教育培养计划项目(13002-07)、“卓越计划”背景下资源勘查工程专业实践教学体系的建设与改革(13JG116)、四川省省高校科研创新团队(12TD0008)联合资助。

作者简介:邹灏,男,1986年生,博士,讲师,主要从事矿产勘查与评价等方面的教研工作;E-mail:zouhao21@sina.com。

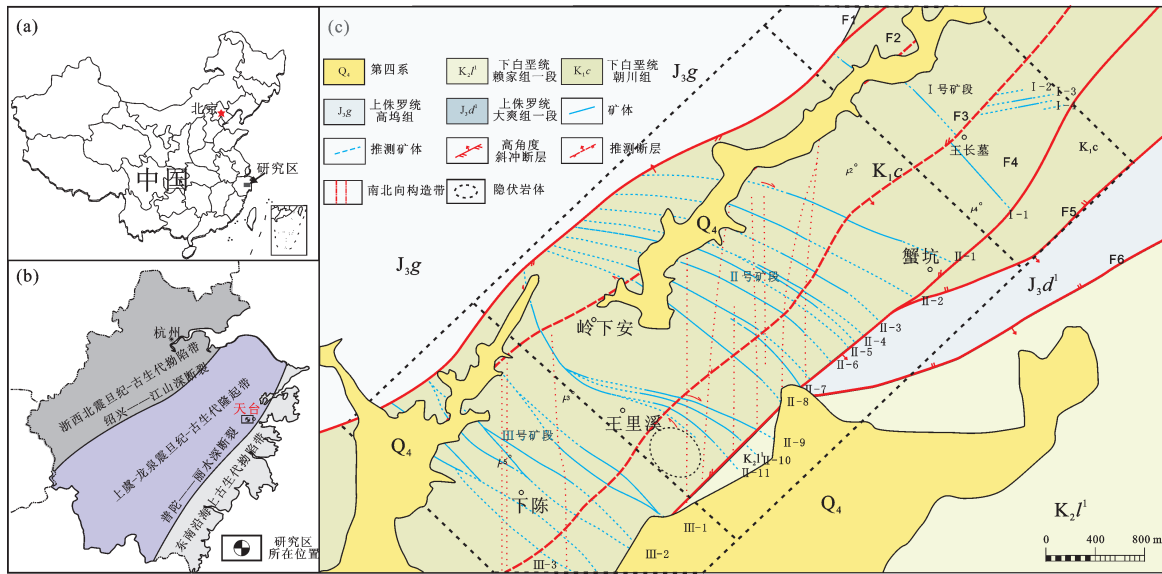


图1 浙江天台盆地地下陈萤石矿区地质图

Fig.1 Geological map of the Xiachen fluorite deposit, Tiantai basin, Zhejiang Province

性、酸性火山碎屑岩,下白垩统朝川组( $K_1c$ )紫红色砂砾岩、细砂岩、粉砂岩和泥岩等沉积岩夹火山碎屑岩和第四系全新统( $Q_4$ )砂砾土层(图1-c)。区内构造以断裂为主,主要有NE向和NW向断裂。NE向断裂成矿期导矿构造,控制着矿区内地层的分布格架和萤石矿展布;NW向断裂为矿区主要布矿—容矿构造,矿体主要赋存于北西向断裂中。

研究区目前已发现26条萤石矿脉,矿(化)点87个,这些萤石矿主要产于朝川组( $K_1c$ )紫红色沉积岩夹火山碎屑岩中。矿体的走向为NW向,在走向上呈舒缓波状,倾向NE或SW,倾角约为 $50^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 。矿体主要由北西向南东侧伏,侧伏角 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 。矿区内各矿带长达2000 m;矿体规模相差不大,长200~300 m,宽2~5 m,最大埋深约200 m。矿石类型为石英—萤石型,矿石矿物为萤石,脉石矿物以石英为主,少量重晶石、方解石,金属矿物含量甚微。矿石结构为自形—半自形—他形粒状结构,矿石构造主要为条带状、块状、角砾状,少量网脉状、晶洞状、斑点状、团块状等。围岩蚀变主要为硅化、绢云母化,少量绿泥石化、高岭土化、碳酸盐化。

## 2 样品采集与分析

本次研究对矿区不同矿带中萤石和石英进行了系统采样,样重一般 $1000\text{ g}\pm$ 。样品单矿物分选由

河北廊坊诚信地质服务有限公司完成,萤石和石英的纯度超过99%。萤石和石英的稀土元素分析均采用ICP-MS方法,测试在Finnigan MAT公司Element型高分辨等离子质谱仪上进行,该仪器对REE检测下限为 $0.1\times 10^{-12}\sim 1\times 10^{-12}$ ;分析结果的相对误差小于10%,绝大多数小于3%;具体分析方法见Qi和Grégoire<sup>[20]</sup>。测试分析在核工业地质分析测试研究中心完成。

浙江天台盆地地下陈矿区萤石、石英及赋矿围岩的微量及稀土元素含量见表1,其稀土元素特征参数见表2~3。本文采用Thompson<sup>[21]</sup>推荐的球粒陨石微量元素数据标准化数据和Boynton<sup>[22]</sup>推荐的球粒陨石REE数据作为标准化数值。

## 3 微量元素地球化学特征

从表1和图2看,萤石样品中的Sr、Ni、Co、Cu含量相对较高,Sr的含量为 $89.60\times 10^{-6}\sim 133.00\times 10^{-6}$ ,平均 $108.23\times 10^{-6}$ ;Ni的含量为 $8.26\times 10^{-6}\sim 9.64\times 10^{-6}$ ,平均 $8.77\times 10^{-6}$ ;Co含量在 $2.76\times 10^{-6}\sim 3.71\times 10^{-6}$ ,平均 $3.24\times 10^{-6}$ ;Cu的变化范围为 $0.55\times 10^{-6}\sim 7.02\times 10^{-6}$ ,平均 $2.63\times 10^{-6}$ 。其他微量元素的含量相对较低,且在各个萤石中表现出较为一致的变化特征。石英中Ba和Sr的含量较高,Ba的变化范围为 $39.10\times 10^{-6}\sim 84.40\times 10^{-6}$ ,平均 $55.60\times 10^{-6}$ ;Sr含量在 $31.40\times 10^{-6}\sim$

表 1 天台盆地萤石矿中萤石、石英和围岩中微量元素及稀土元素组成(10<sup>-6</sup>)  
Table 1 Trace elements and REE composition of fluorites, quartz and wall rocks from the fluorites deposit of Tiantai area (10<sup>-6</sup>)

分析 项目	TT-10	TT-12	TT-15	TT-16	TT-06	TT-25	TT-33	TT-17	TT-48	TT-61	TT-63	TT-65	TT-66	OIB-214 <sup>[23]</sup>	OIB-234 <sup>[23]</sup>	OIB-205 <sup>[23]</sup>
	绿色 萤石	紫色 萤石	无色 萤石	紫色 萤石	石英	石英	石英	紫红色 凝灰岩 (K <sub>1c</sub> )	紫红色含 砾凝灰岩 (K <sub>1c</sub> )	紫红色 凝灰岩 (J <sub>3g</sub> )	深绿色粗 粒凝灰岩 (J <sub>3g</sub> )	深绿色细 粒凝灰岩 (J <sub>3d</sub> )	翠绿色纹层状 凝灰岩 (K <sub>1g</sub> )	斜长角 闪岩 (Anzch)	斜长 角闪岩 (Anzch)	斜长角闪岩 (Anzch)
Li	4.79	0.14	1.25	0.28	299	125.00	399.00	18.10	10.30	5.94	18.20	20.70	55.80	∕	∕	∕
Be	0.03	0.08	0.04	0.04	0.76	1.39	1.34	1.48	2.51	2.49	5.93	2.79	11.70	∕	∕	∕
Sc	0.26	0.22	0.23	0.25	0.7	0.41	0.58	16.90	2.86	5.93	15.40	12.00	1.02	∕	∕	∕
V	0.14	0.14	0.06	0.07	0.54	0.20	0.32	78.10	30.90	2.72	23.40	6.93	0.22	∕	∕	∕
Cr	0.16	0.18	0.19	0.20	0.11	0.26	0.18	0.13	0.99	0.29	5.40	1.50	0.08	∕	∕	∕
Co	2.76	3.44	3.04	3.71	0.06	0.30	0.19	9.34	3.07	0.30	4.29	2.77	0.10	44.10	55.30	14.80
Ni	8.34	8.26	9.64	8.84	0.24	0.06	0.01	0.18	0.88	0.09	2.98	0.64	0.02	161.80	75.73	67.70
Cu	1.82	7.02	1.12	0.55	1.74	1.32	0.59	11.20	10.10	0.67	6.99	6.20	12.50	∕	∕	∕
Zn	2.30	1.81	1.09	2.22	1.73	2.54	1.35	72.40	31.60	64.40	129.00	93.20	77.00	∕	∕	∕
Ga	0.42	0.18	0.26	0.17	0.37	9.95	0.59	17.60	15.60	16.40	29.40	20.00	35.70	∕	∕	∕
Rb	0.20	0.10	0.16	<0.002	7.22	3.36	2.41	54.70	164.00	170.00	209.00	150.00	743.00	96.30	17.50	90.10
Sr	96.30	133.00	89.60	114.00	31.4	39.70	48.60	828.00	328.00	91.20	214.00	300.00	43.70	155.00	145.00	91.80
Y	29.20	21.00	42.60	17.80	0.28	0.05	2.66	32.10	18.60	30.00	76.70	32.90	82.40	33.70	23.10	34.40
Nb	0.02	0.02	0.01	0.01	0.04	0.01	0.01	9.99	11.40	17.70	21.70	20.80	104.00	18.30	23.20	11.20
Mo	0.18	0.33	0.09	0.07	0.19	0.11	0.07	1.55	0.17	0.25	0.41	0.19	7.41	∕	∕	∕
Cd	0.03	0.07	0.11	0.18	0.01	0.05	0.01	0.14	0.09	0.08	0.17	0.15	0.05	∕	∕	∕
In	0.00	0.01	0.01	0.01	<0.0002	0.01	0.00	0.06	0.02	0.05	0.07	0.05	0.04	∕	∕	∕
Sb	0.06	0.07	0.04	0.03	0.48	1.13	1.76	0.09	0.35	0.20	0.18	0.19	0.50	∕	∕	∕
Cs	0.02	0.01	0.02	0.01	0.42	0.69	0.89	4.84	12.20	3.48	3.32	1.47	29.00	8.97	1.00	1.25
Ba	2.15	1.47	1.79	0.88	84.4	43.30	39.10	767.00	1322.00	554.00	1497.00	1416.00	22.20	510.00	253.00	474.00
La	26.10	7.30	10.40	7.73	0.6	0.03	21.10	37.80	27.10	57.20	149.00	57.00	12.10	14.70	21.50	53.10
Ce	46.20	17.30	25.80	18.00	1.31	0.06	32.90	72.40	49.70	117.00	231.00	119.00	36.00	34.50	50.30	107.00
Pr	5.30	2.06	2.96	2.11	0.14	0.01	3.57	9.33	5.26	13.20	36.00	13.90	3.94	4.54	5.98	11.70

续表 1

分析项目	TT-10	TT-12	TT-15	TT-16	TT-06	TT-25	TT-33	TT-17	TT-48	TT-61	TT-63	TT-65	TT-66	OIB-214 <sup>[23]</sup>	OIB-234 <sup>[23]</sup>
	绿色萤石	紫色萤石	无色萤石	紫色萤石	石英	石英	石英	紫红色凝灰岩(K <sub>1c</sub> )	紫红色含砾凝灰岩(K <sub>1c</sub> )	紫红色凝灰岩(J <sub>3g</sub> )	深绿色粗粒凝灰岩(J <sub>3g</sub> )	深绿色细粒凝灰岩(J <sub>3d</sub> )	翠绿色纹层状凝灰岩(K <sub>1g</sub> )	斜长角闪岩(Anzch)	斜长角闪岩(Anzch)
Nd	20.40	20.40	20.40	20.40	0.51	20.40	20.40	20.40	20.40	20.40	20.40	20.40	20.40	20.40	20.40
Sm	3.92	3.92	3.92	3.92	0.11	3.92	3.92	3.92	3.92	3.92	3.92	3.92	3.92	3.92	3.92
Eu	1.62	1.62	1.62	1.62	0.02	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62
Gd	3.91	3.91	3.91	3.91	0.09	3.91	3.91	3.91	3.91	3.91	3.91	3.91	3.91	3.91	3.91
Tb	0.62	0.62	0.62	0.62	0.01	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62
Dy	3.05	3.05	3.05	3.05	0.06	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05
Ho	0.50	0.50	0.50	0.50	0.01	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Er	1.04	1.04	1.04	1.04	0.02	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04
Tm	0.13	0.13	0.13	0.13	0.004	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
Yb	0.63	0.63	0.63	0.63	0.03	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63
Lu	0.06	0.06	0.06	0.06	0.004	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Ta	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
W	0.23	0.23	0.23	0.23	0.14	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
Re	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
Tl	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pb	1.35	1.35	1.35	1.35	2.52	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35
Bi	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Th	0.02	0.02	0.02	0.02	0.07	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
U	0.04	0.04	0.04	0.04	0.02	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Zr	0.19	0.19	0.19	0.19	0.91	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
Hf	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

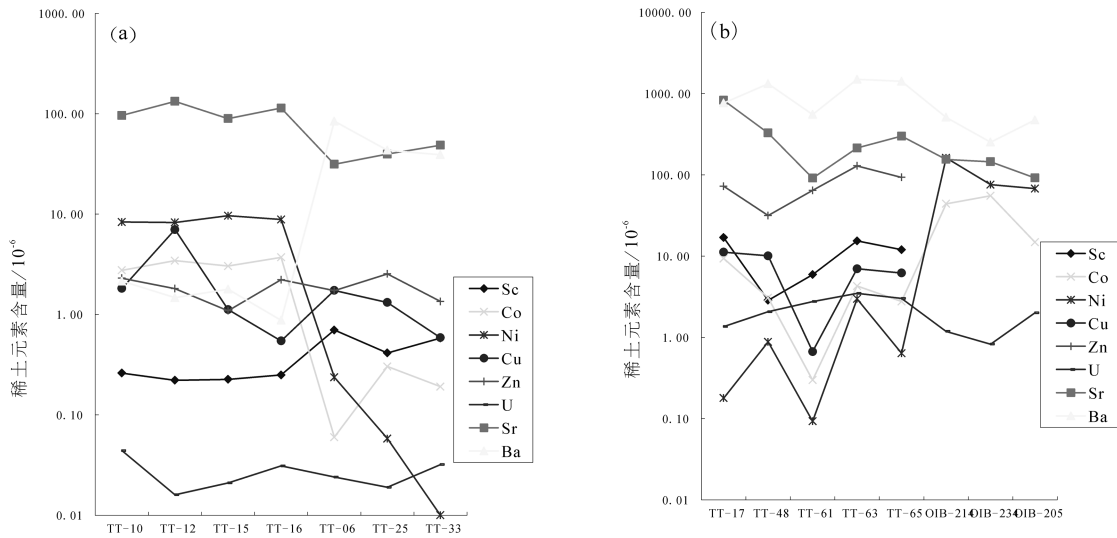


图2 天台盆地地下陈萤石矿床的微量元素含量变化曲线  
a—萤石和石英;b—围岩

Fig.2 Plots of trace element content of fluorite from the Xiachen fluorite deposit, Tiantai basin  
a-Fluorite and quartz; b-Wall rocks

表2 天台盆地萤石矿中萤石和石英稀土元素组成的特征参数

Table 2 REE characteristic parameters of fluorites from the Xiachen fluorite deposit, Tiantai basin

编号	岩石	ΣREE	ΣLREE	ΣMREE	ΣHREE	ΣLREE/ΣHREE	(La/Yb) <sub>N</sub>	(La/Sm) <sub>N</sub>	(Gd/Yb) <sub>N</sub>	Sm/Nd	δEu	δCe	La/Ce
TT-10	绿色萤石	142.67	98.00	13.62	31.06	3.16	27.89	4.19	5.00	0.19	1.27	0.95	0.56
TT-12	紫色萤石	68.18	35.08	10.60	22.51	1.56	9.41	1.63	4.06	0.33	1.43	1.07	0.42
TT-15	无色萤石	111.18	51.66	14.82	44.71	1.16	10.02	1.77	4.38	0.30	1.21	1.12	0.40
TT-16	紫色萤石	64.91	36.17	9.61	19.14	1.89	11.06	1.83	4.18	0.32	1.36	1.07	0.43
TT-06	石英	3.19	2.56	0.30	0.34	7.56	13.83	3.37	2.48	0.22	0.52	1.09	0.45
TT-25	石英	0.22	0.12	0.03	0.07	1.75	2.61	3.25	1.11	0.23	0.75	0.93	0.54
TT-33	石英	78.57	70.27	5.28	3.02	23.28	138.11	6.38	14.34	0.16	0.80	0.91	0.64

注:ΣREE、ΣLREE、ΣHREE单位为10<sup>-6</sup>; δEu = Eu<sub>N</sub>/√(Sm<sub>N</sub> × Gd<sub>N</sub>) δCe = Ce<sub>N</sub>/√(La<sub>N</sub> × Pr<sub>N</sub>)。

48.60×10<sup>-6</sup>,平均39.90×10<sup>-6</sup>;其他微量元素的含量相对较低。而围岩中Ba和Sr的含量非常高,Ba含量在554.00×10<sup>-6</sup>~1497.00×10<sup>-6</sup>,平均1111.20×10<sup>-6</sup>;Sr的变化范围为91.20×10<sup>-6</sup>~828.00×10<sup>-6</sup>,平均352.24×10<sup>-6</sup>;而在陈蔡群变质岩系中,Ba、Sr、Ni、Co出现高异常,Ba的含量为253.00×10<sup>-6</sup>~510.00×10<sup>-6</sup>,平均412.33×10<sup>-6</sup>;Sr含量在91.80×10<sup>-6</sup>~155.00×10<sup>-6</sup>,平均130.60×10<sup>-6</sup>;Ni的变化范围为67.70×10<sup>-6</sup>~161.80×10<sup>-6</sup>,平均101.74×10<sup>-6</sup>;Co含量在14.80×10<sup>-6</sup>~55.30×10<sup>-6</sup>,平均

38.07×10<sup>-6</sup>。

在微量元素的球粒陨石标准化蛛网图上(图3),萤石的微量元素配分型式近乎一致(图3-a),亏损Nb、Zr、Ti,富集La、Ce、Sm、Nd和Y,反映了萤石矿床形成过程中源区的相似性。石英的微量元素配分型式虽然具有一定的差异性,但均亏损Nb富集Rb(图3-b)。围岩的微量元素配分型式近乎一致(图3-c),亏损Nb、Sr、Y、Tm、Yb,富集Rb、Th、La、Sr、Nd、Zr、Hf。



表3 天台盆地萤石矿赋矿围岩稀土元素组成的特征参数

样品及 编号	$\Sigma\text{REE}$	$\Sigma\text{LREE}$	$\Sigma\text{MREE}$	$\Sigma\text{HREE}$	$\frac{\Sigma\text{LREE}}{\Sigma\text{HREE}}$	$(\text{La}/\text{Yb})_N$	$(\text{La}/\text{Sm})_N$	$(\text{Gd}/\text{Yb})_N$	$\text{Sm}/\text{Nd}$	$\delta\text{Eu}$	$\delta\text{Ce}$	$\text{La}/\text{Ce}$
紫红色凝灰岩 ( $K_1c$ )												
TT-17	189.83	157.13	25.54	39.26	4.00	8.06	2.96	1.74	0.21	0.97	0.93	0.52
TT-48	117.86	100.76	12.61	23.09	4.36	8.58	4.61	1.33	0.20	0.97	1.00	0.55
TT-61	262.83	232.40	23.37	37.06	6.27	12.20	4.50	1.79	0.18	0.40	1.02	0.49
深绿色粗粒凝灰岩 ( $J_3g$ )												
TT-63	667.13	571.00	80.56	92.27	6.19	16.02	3.36	3.08	0.18	0.61	0.76	0.65
TT-65	273.68	239.80	26.93	39.85	6.02	12.77	3.96	2.07	0.18	0.76	1.02	0.48
斜长角闪岩 ( $\text{Anzch}$ )												
OIB-214 <sup>[23]</sup>	102.13	73.74	19.77	42.31	1.74	2.64	1.95	1.23	0.24	0.82	1.02	0.43
OIB-234 <sup>[23]</sup>	127.51	103.28	19.55	27.78	3.72	8.19	2.42	2.65	0.22	1.02	1.07	0.43
OIB-205 <sup>[23]</sup>	248.40	215.20	25.45	42.15	5.11	12.79	4.27	2.21	0.18	0.70	1.03	0.50

注: $\Sigma\text{REE}$ 、 $\Sigma\text{LREE}$ 、 $\Sigma\text{HREE}$ 单位为 $10^{-6}$ ;  $\delta\text{Eu} = \text{Eu}_N / \sqrt{\text{Sm}_N \times \text{Gd}_N}$   $\delta\text{Ce} = \text{Ce}_N / \sqrt{\text{La}_N \times \text{Pr}_N}$ 。

## 4 稀土元素地球化学特征

不同的成岩成矿作用,其REE的丰度和地球化学行为不同,因此对REE进行研究所获取的各种信息,是追踪成岩成矿作用过程及物质来源的重要手段。笔者试图从矿石和赋矿围岩的稀土元素地球化学特征来获取该地区萤石矿床的物质来源方面的信息。

本文在描述和讨论稀土元素地球化学特征过程中,按三分法将稀土元素划分为轻稀土(LREE): La~Nd; 中稀土(MREE): Sm~Ho 和重稀土(HREE): Er~Lu+Y 3类<sup>[24]</sup>。根据稀土元素的有关参数和配分模式,将研究区的稀土元素特征分为3种类型, LREE 富集型( $(\text{La}/\text{Sm})_N$  大于 1), LREE 平坦型( $(\text{La}/\text{Sm})_N$  约等于 1)和LREE 亏损型( $(\text{La}/\text{Sm})_N$  小于 1)。

### 4.1 萤石和石英稀土元素特征

从表1和表2可见,萤石的 $\Sigma\text{REE}$ (加Y的含量,下同)为 $64.91 \times 10^{-6} \sim 142.67 \times 10^{-6}$ ,平均值为 $96.74 \times 10^{-6}$ 。萤石中 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 比值为1.16~3.16,平均为1.94;  $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值为9.41~27.89,平均为14.59;该值说明曲线呈较陡的右倾斜型。 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 比值为1.63~4.19,平均为2.35;  $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 比值为4.06~5.00,平均为4.40;说明萤石轻稀土相对富集,重稀土相对亏损。 $\text{Sm}/\text{Nd}$ 比值为0.19~0.33,平均为0.29。

而石英的 $\Sigma\text{REE}$ 含量是 $0.22 \times 10^{-6} \sim 78.57 \times 10^{-6}$ ,平

均值为 $27.33 \times 10^{-6}$ ,石英的 $\Sigma\text{REE}$ 一般低于萤石,两者稀土元素含量均较低,表明岩浆流体未参与成矿,稀土元素应主要来自于沉积岩。石英的 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}=1.75 \sim 23.28$ ,平均:10.86;  $(\text{La}/\text{Yb})_N=2.61 \sim 138.11$ ,平均为51.52。 $(\text{La}/\text{Sm})_N=3.37 \sim 6.38$ ,平均:4.33;  $(\text{Gd}/\text{Yb})_N=1.11 \sim 14.34$ ,平均:5.97;反映了石英中轻稀土相对富集,重稀土相对亏损,稀土元素配分模式曲线为右倾斜的轻稀土富集型。 $\text{Sm}/\text{Nd}=0.16 \sim 0.23$ ,平均:0.20。

从稀土配分模式图上发现(图4-a,b),Eu的变化较为明显,萤石中的 $\delta\text{Eu}$ 为1.21~1.43,平均为1.31,显示较弱的Eu正异常;  $\delta\text{Ce}$ 为0.95~1.12,平均为1.05,表现为Ce弱正异常;而石英中的 $\delta\text{Eu}=0.52 \sim 0.80$ ,平均:0.69,显示较弱的Eu正异常;  $\delta\text{Ce}=0.91 \sim 1.09$ ,平均:0.98,表现出较弱的Ce负异常。

### 4.2 赋矿围岩稀土元素特征

测试结果表明,围岩中的稀土元素总量( $\Sigma\text{REE}$ )、轻稀土(LREE)、中稀土(MREE)、重稀土(HREE)含量均高于矿石。从表1和表3可见,赋矿围岩的 $\Sigma\text{REE}$ 含量为 $117.86 \times 10^{-6} \sim 667.13 \times 10^{-6}$ ,平均为 $302.26 \times 10^{-6}$ ;  $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 比值较稳定,为4.00~6.27,平均为5.37;  $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值为8.06~16.02,平均为11.53;  $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 比值为2.96~4.61,平均为3.88;  $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 比值为1.33~3.08,平均为2.00;说明轻稀土相对富集,重稀土显示相对亏损,配分曲线显示右倾斜。 $\text{Sm}/\text{Nd}$ 的比值

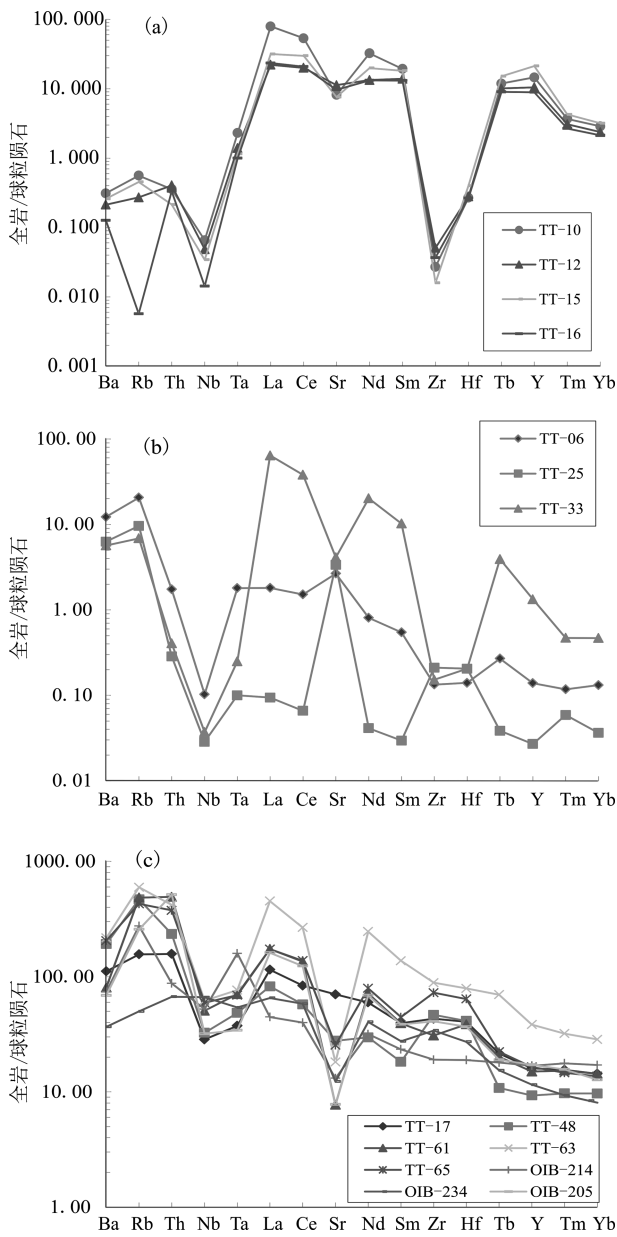


图3 浙江天台盆地下陈萤石矿床的微量元素蛛网图  
(标准化数据据Thompson<sup>[21]</sup>)  
a—萤石;b—石英;c—围岩

Fig.3 Chondrite-normalized trace element spidergrams of the Xiachen fluorite deposit, Tiantai basin, Zhejiang Province  
a-Fluorite; b-Quartz; c-Wall rocks

为0.18~0.21,平均为0.19。

陈蔡群变质基底的 $\Sigma$ REE与赋矿围岩 $\Sigma$ REE相差不大,为 $102.13 \times 10^{-6} \sim 248.40 \times 10^{-6}$ ,平均159.35; $\Sigma$ LREE/ $\Sigma$ HREE为1.74~5.11,平均3.52;(La/Yb)<sub>N</sub>

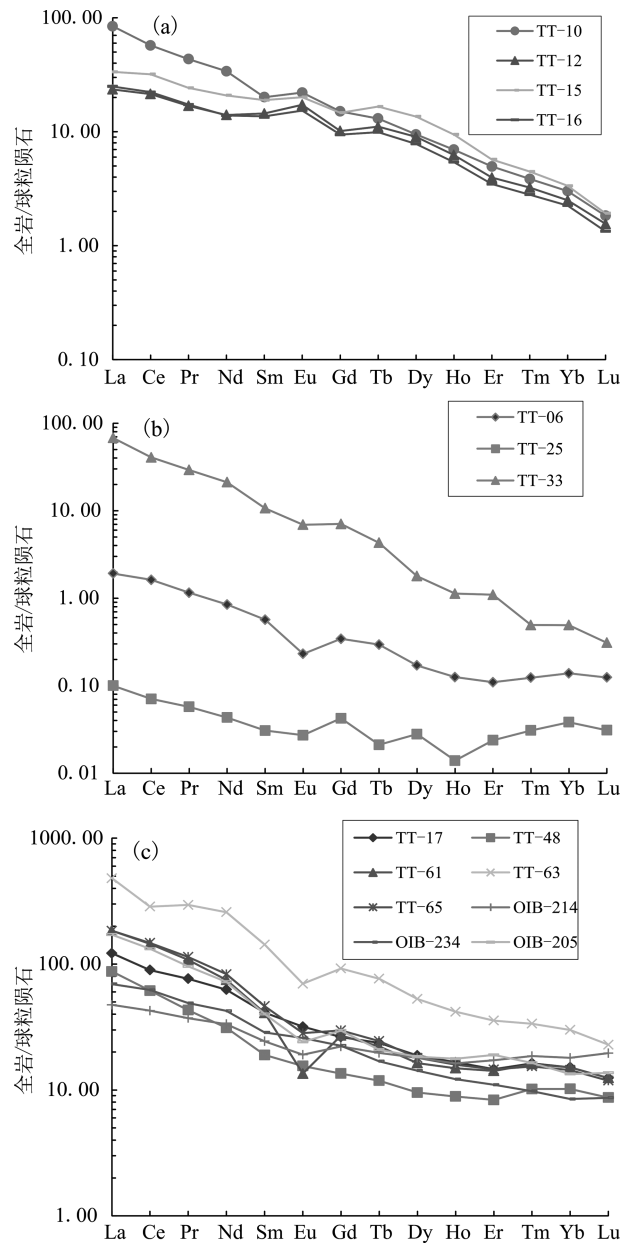


图4 浙江天台盆地下陈萤石矿床的稀土元素配分模式图  
(标准化数据据Boynton<sup>[22]</sup>)  
a—萤石;b—石英;c—围岩

Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns of the Xiachen fluorite deposit, Tiantai basin, Zhejiang Province  
a-Fluorite; b-Quartz; c-Wall rocks

的比值为2.64~12.79,平均7.87;(La/Sm)<sub>N</sub>的比值为1.95~4.27,平均2.88;(Gd/Yb)<sub>N</sub>的比值为1.23~2.65,平均2.03;Sm/Nd为0.18~0.24,平均0.21。稀土元素配分模式曲线为较陡的右倾斜轻稀土富集型(图4-

c)。δEu为0.82~1.02,平均0.85,显示较弱的Eu负异常。δCe值为1.02~1.07,呈现弱的Ce正异常。

## 5 讨 论

### 5.1 微量与稀土元素特征

由图3与表1可知矿区内萤石的微量元素特征表明矿区内的萤石样品微量元素变化相似,Sr、Ni、Co、Cu含量相对较高,除了Sr元素含量高以外,Ni的含量也出现了高异常,指示萤石成矿作用过程中物质源区具有一致性,同时可能暗示成矿物质来源中有幔源或下地壳组分的加入<sup>[25]</sup>。陈蔡群变质基底的Ni含量也非常高,说明萤石的成矿物质来源和陈蔡群变质基底有着一定的关系。石英中Ba含量较高,这与围岩中各个地层中的Ba含量普遍较高有着密切的关系。

由图4-a、b与表1可知,浙江天台盆地下陈萤石矿床中萤石的REE配分模式变化的整体趋势是相同的。萤石与石英REE配分模式既有相似性也有不同点,但整体趋势也是一致的。因此,浙江天台盆地下陈萤石矿中萤石的成矿物质来源是相同的,且萤石和石英的物源也具有相似性。

Sm和Nd化学性质十分相似,不易分离,故Sm/Nd比值能较好地反映出源区的特征<sup>[26]</sup>。研究区萤石的Sm/Nd比值为0.19~0.33,平均为0.29;石英的Sm/Nd比值为0.16~0.23,平均为0.20;赋矿围岩的Sm/Nd的比值为0.18~0.21,平均为0.19,而陈蔡群变质岩系的Sm/Nd=0.18~0.24,平均:0.21。有Sm/Nd比值的数据可知,萤石、石英与各个地层的Sm/Nd比值差别不大,说明萤石的成矿物质与各个围岩均有可能有关。

### 5.2 δEu和δCe

少数稀土元素(REE)在自然界除了三价阳离子存在,还有其他氧化价态,但具有地球化学意义的只有Ce<sup>4+</sup>和Eu<sup>2+</sup><sup>[27]</sup>。REE的三价阳离子半径只有很小的系统性的差别,这是它们在自然界紧密共生共同迁移的主要原因,同时这种系统性的差别也是发生分离的重要原因<sup>[26,28]</sup>。Eu和Ce是变价元素,对外界氧化还原条件的反应很灵敏,在氧化条件下,Ce<sup>3+</sup>变成Ce<sup>4+</sup>,粒子半径减小,Ce<sup>4+</sup>易于进入矿物晶格中。在还原条件下,Eu<sup>3+</sup>变成Eu<sup>2+</sup>,粒子半径增大, Eu<sup>2+</sup>不易进入矿物晶格中<sup>[29]</sup>。因此,Eu和Ce的价态

变化能很好的反映成矿流体的氧化还原条件<sup>[4]</sup>。

Eu在遭受氧化性的地下水(大气降水一般溶有O<sub>2</sub>)淋滤时,易由Eu<sup>2+</sup>变为Eu<sup>3+</sup>,离子半径变小。在较高温度和还原条件下,Eu在热液流体中主要呈Eu<sup>2+</sup>,流体运移过程中颗粒或岩石对Eu之外的其他稀土元素优先吸附,从而导致热液流体呈现Eu正异常<sup>[30]</sup>。此外,萤石中Eu正异常通常指示成矿流体在萤石从低温状态下结晶沉淀之前经历了足够的高温状态,导致Eu发生了还原作用<sup>[2]</sup>。从稀土配分模式图(图4)与相关元素比值(表1,表2)可以看出,研究区萤石中Eu的异常具有明显的规律性,萤石呈现为弱的Eu正异常,而石英则呈现弱的Eu负异常,说明萤石和石英的成矿物质来源有所不同。研究区所有萤石和石英的Ce异常也有差别,但总体上说萤石和石英样品δCe大都在1左右,Ce基本不显异常。

### 5.3 稀土元素图解

#### (1)La/Ho-Y/Ho关系图

Bau和Dulski<sup>[31]</sup>在1995年研究了德国和英国数个矿床中萤石的Y元素与其他REE的关系后,总结出了La/Ho-Y/Ho关系图,并指出Y、Ho的分馏现象并不取决于流体来源,而是取决于流体的组成及其物理化学性质。同源同期形成的萤石中Y/Ho与La/Ho之间的值具有相似性,其两者比值应趋近一直线;同源非同期结晶的萤石Y/Ho与La/Ho值呈负相关;而重结晶的萤石中Y/Ho变化较小,La/Ho变化范围较宽。

从图5可见,浙江天台盆地下陈萤石矿的萤石在Y/Ho-La/Ho图中基本呈水平分布,足以说明该成矿带上萤石的成矿物质是同源的,且几乎是同期成矿的;将石英的Y/Ho与La/Ho值投入图中,发现其与萤石也几乎在一条直线,说明萤石与石英应为同期形成的产物。

#### (2)Tb/Ca-Tb/La关系图

Tb/Ca-Tb/La关系图是Moller等<sup>[32]</sup>在对全球150多个萤石样品测试数据分析的基础上,以Tb/Ca、Tb/La的原子数之比(下同)为参数而做出的萤石矿床成因判别图,并划分出了伟晶岩气液成因区、热液成因区和沉积成因区3个成因区,其纵坐标(Tb/Ca比值)代表萤石形成的地球化学环境,横坐标(Tb/La比值)表示稀土元素的分馏程度<sup>[18]</sup>。通过该图解能有效的判别出萤石的成因类型,以及成矿流



体是否与围岩发生了水岩反应<sup>[32-33]</sup>。Tb/Ca-Tb/La双变量图解已被广泛应用于萤石的成因辨析。

Tb/Ca值反映成矿流体对含Ca围岩的交代混染作用和REE在流体中的吸附作用<sup>[25]</sup>。伟晶岩型矿床的萤石中Ca含量最低,Tb/Ca值最大;沉积型萤石矿床,受地层影响,其萤石中Ca含量最高,Tb/Ca值最小;热液型萤石中,Tb/Ca值居其间(图6)。由于在流体迁移过程中,Tb和La络合物的稳定性不同,随着流体中萤石的结晶成矿,会导致晚期结晶的矿物富Tb贫La。所以,Tb/La值从小到大,反映出REE的分馏程度和萤石结晶的先后顺序<sup>[34]</sup>。

将下陈萤石矿床中萤石矿石的相关数据投入该图,全部落入热液成因的区域内(图6),表明本区萤石矿系热液成因的产物。

#### 5.4 成矿物质来源

本区萤石的成矿作用与岩浆活动无明显联系,因而REE及成矿物质(如Ca、F等)应主要是流体循环与岩石相互作用,通过水/岩反应获得的,溶液淋滤地层,使地层释放REE及成矿物质进入溶液。因此这种溶液的组成也应是矿源层REE组成的反映<sup>[37]</sup>,而能反映溶液REE组成的沉淀物(矿物)的

REE组成也应与这种矿源层的REE相同(似)。REE的来源在一定程度上间接地反映了溶液中其他物质的来源,但这种反映不仅仅单纯地反映某一种或几种元素的来源,而是一个综合的结果,本区成矿流体中REE主要来自围岩,同时也表明溶液中的其他物质(如Ca、Ba、Mg、K、Na等)也与围岩有关。此外,通过对萤石与围岩的稀土元素特征研究发现,本区赋矿围岩朝川组地层的组成对成矿物质的影响是显而易见的。成矿主要物质之一的Ca元素可能主要是由大气降水对朝川组地层的淋滤萃取而来的,经过水/岩反应将成矿元素汇聚到成矿热流体场。而F可能以 $\text{SiF}_6^{2-}$ 、 $\text{NaF}^0$ 、 $\text{HF}^0$ 、 $\text{MgF}^+$ 、 $\text{FeF}_2^+$ 、 $\text{AlF}_2^+$ 等络合物的形式赋存于运移的热液中,这可从成矿过程中围岩普遍发生硅化、绢云母化和高岭土化等蚀变中得到证实。成矿物质F的来源除了朝川组地层以外(表4),区域上富F的陈蔡群变质岩系具富含F的角闪石,也非常有可能是F的主要来源之一。

综上所述,笔者认为天台盆地下陈萤石矿区内矿体多呈脉状产出,其形态、产状和规模受构造裂隙的控制作用十分明显,显示出构造裂隙对成矿热液的输导控制和容矿作用;通常情况下,矿体与围

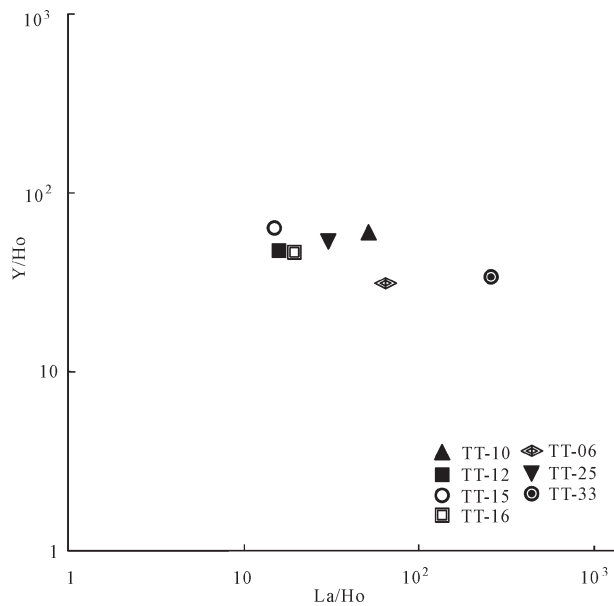


图5 天台盆地下陈矿区石英与萤石的La/Ho-Y/Ho图解  
(底图据Bau和Dulski<sup>[31]</sup>)

Fig.5 La/Ho-Y/Ho diagram of fluorite from the Xiachen fluorite deposit, Tiantai basin  
(base map after Bau and Dulski<sup>[31]</sup>)

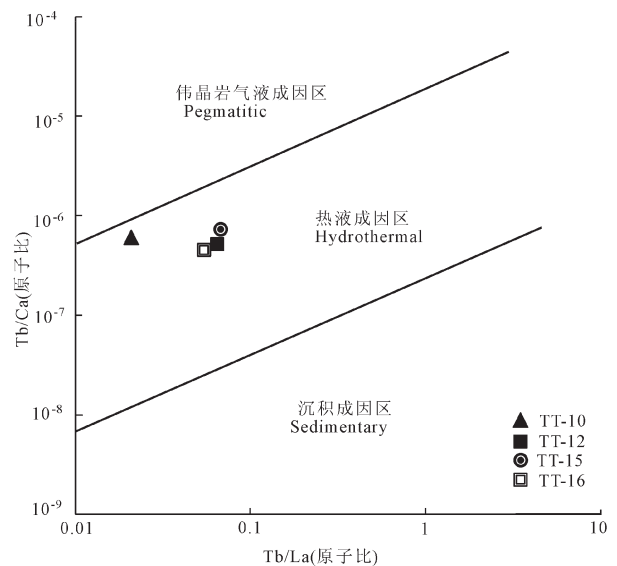


图6 天台盆地下陈矿区萤石的Tb/Ca-Tb/La图解  
(底图据Moller et al.<sup>[32]</sup>)

Fig.6 Tb/Ca versus Tb/La diagram of fluorite from the Xiachen fluorite deposit, Tiantai basin  
(base map after Moller et al.<sup>[32]</sup>)

表4 浙江各地层F含量一览

Table 4 F content of some strata in Zhejiang Province

地 层	F的变化范围/%	F的平均值/%	数据来源
朝川组 (K <sub>1c</sub> )	0.033-0.114	0.070	[35]
九里坪组 (J <sub>3j</sub> )	0.016-0.038	0.029	[35]
高坞组 (J <sub>3g</sub> )	0.008-0.460	0.072	[35]
大爽组 (J <sub>3d</sub> )	0.005-0.385	0.060	[35]
陈蔡群 (Anzch)	0.002-0.630	0.094	[35]
F 克拉克值 0.050			[36]

岩界线清晰。在Tb/Ca-Tb/La图(图6),所采集的矿石样品基本都落入热液成因的区域内。从区域资料来看,萤石矿床是在低温热液系统中形成的。因此,研究区萤石矿为低温热液成因—断裂带充填交代型矿床。

## 6 结 论

通过对浙江天台盆地下陈萤石矿中,萤石、石英和围岩的微量和稀土元素地球化学特征的分析,得到如下结论:

(1)天台盆地下陈萤石矿中围岩的稀土总量、轻稀土、中稀土和重稀土的含量远高于矿石。萤石、石英和围岩的稀土元素特征均为轻稀土相对富集,重稀土显示相对亏损,配分曲线显示较陡的右倾斜。

(2)根据La/Ho-Y/Ho关系图,该成矿带上萤石的成矿物质是同源的,且几乎是同期成矿的。又萤石与石英为同期形成的产物。

(3)天台盆地下陈萤石矿的成矿物质Ca元素可能主要朝川组紫红色沉积岩,F的来源除了朝川组地层以外,陈蔡群变质岩系也应是F的主要来源之一。

(4)综合矿床地质特征关系图及其Tb/Ca-Tb/La,说明浙江天台盆地下陈萤石矿为低温热液成因—断裂带充填交代型矿床。

### 参考文献(References):

- [1] 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: 219-230.
- [2] Bau M and Moller P. Rare earth element fractionation in metamorphic hydrothermal calcite, magnesite and siderite[J]. *Mineralogy and Petrology*, 1992, 45: 231-246.
- [3] 黄凡,王登红,陈毓川,等. 中国钼矿中辉钼矿的稀土元素地球化

学及其应用[J]. *中国地质*, 2013, 40(1): 287-301.

Huang Fan, Wang Denghong, Chen Yuchuan, et al. REE characteristics of molybdenites from endogenous molybdenum deposits in China[J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 287-301(in Chinese with English abstract).

- [4] 张建芳,解怀生,许兴苗,等. 浙江漓渚地区栅溪—广山岩体地质地球化学特征、构造及找矿意义[J]. *中国地质*, 2013, 40(2): 403-413.

Zhang Jianfang, Xie Huaisheng, Xu Xingmiao, et al. Geological and geochemical characteristics and tectonic and prospecting significance of the Shanxi-Guangshan intrusions in Lizhu area, Zhejiang Province[J]. *Geology in China*, 2013, 40(2): 403-413(in Chinese with English abstract).

- [5] 王立强,程文斌,罗茂澄,等. 西藏蒙亚啊铅锌矿床金属硫化物、石英稀土元素组成特征及其成因研究[J]. *中国地质*, 2012, 39(3): 740-749.

Wang Liqiang, Cheng Wenbin, Luo Maocheng, et al. A study of metallic sulfides, quartz REE composition characteristics and genesis of the Mengya'a lead-zinc deposit[J]. *Geology in China*, 2012, 39(3): 740-749 (in Chinese with English abstract).

- [6] Bau M, Dulski P. Comparative study of Yttrium and rare-earth element behaviors in fluorine-rich hydrothermal fluids[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1995, 119: 213-223.

- [7] Bau M. Controls on the fractionation of isoivalent trace elements in magmatic and aqueous systems: Evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1996, 123: 323-333.

- [8] 何高文,孙晓明,杨胜雄,等. 太平洋多金属结核和富钴结壳稀土元素地球化学对比及其地质意义[J]. *中国地质*, 2011, 38(2): 462-472.

He Gaowen, Sun Xiaoming, Yang Shengxiong, et al. A comparison of REE geochemistry between polymetallic nodules and cobalt-rich crusts in the Pacific Ocean[J]. *Geology in China*, 2011, 38(2): 462-472(in Chinese with English abstract).

- [9] 黄凡,王登红,陈毓川,等. 中国钼矿中辉钼矿的稀土元素地球化学及其应用[J]. *中国地质*, 2013, 40(1): 287-301.

Huang Fan, Wang Denghong, Chen Yuchuan, et al. REE characteristics of molybdenites from endogenous molybdenum deposits in China[J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 287-301(in Chinese with English abstract).

- [10] Schwinn G and Markl G. REE systematics in hydrothermal fluorite[J]. *Chemical Geology*, 2005, 216: 225-248.

- [11] 曹俊臣. 中国萤石矿床稀土元素地球化学及萤石的矿物物理特征[J]. *地质与勘探*, 1997, 33(2): 18-23.

Cao Junchen. Geochemistry of REE of fluorite deposit and physical properties of fluorite mineral in China[J]. *Geology and Prospecting*, 1997, 33(2): 18-23 (in Chinese with English abstract).

- [12] Monecke T, Monecke J and Munch W, et al. Mathematical

- analysis of rare earth element patterns of fluorites from the Ehrenfrieder- sdorf tin deposit, Germany: Evidence for a hydrothermal mixing process of lanthanides from two different sources [J]. *Mineralogy and Petrology*, 2000, 70: 235–256.
- [13] 彭建堂, 胡瑞忠, 漆亮, 等. 晴隆锑矿床中萤石的稀土元素特征及其指示意义[J]. *地质科学*, 2002, 37(3): 277–287.  
Peng Jiantang, Hu Ruizhong, Qi Liang, et al. REE geochemistry of fluorite from the Qinglong antimony deposit and its geological implications[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2002, 37(3): 277–287 (in Chinese with English abstract).
- [14] 王国芝, 胡瑞忠, 刘颖, 等. 黔西南晴隆锑矿区萤石的稀土元素地球化学特征[J]. *矿物岩石*, 2003, 23(2): 62–65.  
Wang Guozhi, Hu Ruizhong, Liu Yin, et al. REE geochemical characteristic from fluorite in Qinglong antimony deposit, south-western Guizhou[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2003, 23(2): 62–65(in Chinese with English abstract).
- [15] 许成, 黄智龙, 漆亮, 等. 四川牦牛坪稀土矿床成矿流体来源与演化初探——萤石稀土地球化学的证据[J]. *地质与勘探*, 2001, 37(5): 24–28.  
Xu Cheng, Huang Zhilong, Qi Liang, et al. Source and evolution of ore-forming fluids of Maoniuping rare-earth deposit: evidence from REE geochemistry of fluorites[J]. *Geology and Prospecting*, 2001, 37(5): 24–28 (in Chinese with English abstract).
- [16] 许成, 黄智龙, 漆亮, 等. 四川牦牛坪稀土矿床萤石REE配分模式的影响因素[J]. *矿物学报*, 2001, 21(3): 556–559.  
Xu Cheng, Huang Zhilong, Qi Liang, et al. Factors affecting the REE patterns of fluorites in Maoniuping REE deposit, Sichuan Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2001, 21(3): 556–559 (in Chinese with English abstract).
- [17] 张兴阳, 顾家裕, 罗平. 塔中45井萤石成因与油气成藏[J]. *新疆石油地质*, 2004, 25(5): 479–482.  
Zhang Xingyang, Gu Jiayu, Luo Ping. Fluorite origin and petroleum reservoir in Well TZ- 45 in Tarim basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2004, 25(5): 479– 482 (in Chinese with English abstract).
- [18] 赵省民, 聂凤军, 江思宏, 等. 内蒙古东七—山萤石矿床的稀土元素地球化学特征及成因[J]. *矿床地质*, 2002, 21(3): 311–316.  
Zhao Shengmin, Nie Fengjun, Jiang Sihong, et al. REE geochemistry and genesis of Dongqi-yishan fluorite deposit, Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 2002, 21(3): 311–316 (in Chinese with English abstract).
- [19] Alvin M P, Dunphy J M, Groves D I. Nature and genesis of a carbonatite-associated fluorite deposit at Speewah, East Kimberle region, Western Australia[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2004, 80: 127–153.
- [20] Qi L, Grégoire D C. Determination of trace elements in twenty-six Chinese geochemistry reference materials by Inductively Coupled Plasma- Mass Spectrometry[J]. *Geostandards Newsletters*, 2000, 24(1): 51–63.
- [21] Thompson R.N. British Tertiary volcanic province[J]. *Scottish Journal of Geology*, 1982, 18, 59–107.
- [22] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorites studies[J]. *Developments in Geochemistry*, 1984, 2: 63–114.
- [23] 陈绍海, 周新华, 李继亮, 等. 浙江陈蔡群斜长角闪岩的地球化学特征及其大地构造背景探讨[J]. *地质学报*, 1999, 34(2): 154–165.  
Chen Shaohai, Zhou Xinhua, Li Jiliang et al. Geochemistry of the amphibolites from Chencai Group, Zhejiang Province: Implications for the tectonic settings[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1999, 34(2): 154–165. (in Chinese with English abstract).
- [24] 韩吟文, 马振东. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 46–49.  
Han Yinwen, Ma Zhengdong. *Geochemistry*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 46– 49 (in Chinese with English abstract).
- [25] 许东青, 聂凤军, 钱明平, 等. 苏莫查干敖包超大型萤石矿床的稀土元素地球化学特征及其成因意义[J]. *矿床地质*, 2009, 28(1): 29–41.  
Xu Dongqing, Nie Fengjun, Qian Mingping, et al. REE geochemistry and genesis of Sumochagan Obo superlarge fluorite deposit[J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28(1): 29–41 (in Chinese with English abstract).
- [26] 刘英俊, 曹励明. 元素地球化学导论[M]. 北京: 地质出版社. 1987: 194–205.  
Liu Yingjun, Cao Liming. *Element Geochemistry Introduction*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 194–205 (in Chinese with English abstract).
- [27] Hugh R. Rollison, Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation[M]. Longman, Edinburgh Gate, 1993, 242–291.
- [28] Taylor R P, Fryer B J. Rare earth element geochemistry as an aid to interpreting hydrothermal ore deposits[C]//Evans A M(ed.). *Metallization associated with acid magmatism*. John Wiley and Sons Ltd., 1982.
- [29] 王中刚, 于学元, 赵振华. 稀土元素地球化学. 北京: 科学出版社, 1989: 88–93.  
Wang Zhonggang, Yu Xueyuan, Zhao Zhenhua. *REE Chemistry*[M]. Beijing: Science Press, 1989: 88–93 (in Chinese with English abstract).
- [30] 丁振举, 姚书振, 刘丛强, 等. 东沟坝多金属矿床喷流沉积成矿特征的稀土元素地球化学示踪[J]. *岩石学报*, 2003, 19(4): 792–798.  
Ding Zhengjun, Yao Shuzhen, Liu Congqiang, et al. The characteristics of exhalation- sedimentary deposit of Donggouba polymetal deposit: Evidence from ore's REE composition[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(4): 792–798 (in Chinese with English abstract).
- [31] Bau M, Dulski P. Comparative study of Yttrium and rare-earth element behaviors in fluorine- rich hydrothermal fluids[J].

- Contributions to Mineralogy and Petrology, 1995, 119: 213–223.
- [32] Moller P, Parekh P P, Schneider H J. The application of Tb/Ca–Tb/La abundance ratios to problems of fluorite genesis[J]. Mineralium Deposita, 1976, 11(1):111–116.
- [33] Schneider H J, Moller P, Parekh P P. Rare earth element distribution in fluorites and carbonate sediments of the east Alpine mid Triassic sequences in the Nordliche Kalkalpen[J]. Mineralium Deposita, 1975, 10: 330–344.
- [34] Constantopoulos J. Fluid inclusions and rare earth element geochemistry of fluorite from south central Idaho[J]. Economic Geology, 1988, 83(3): 626–636.
- [35] 韩文彬, 马承安. 萤石矿床特征及其地球化学——以武义萤石矿为例[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- Han Wenbin, Ma Cheng'an. Geology and Geochemical characteristics of fluorite deposits—With Wuyi ore field in Zhejiang province as example[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991 (in Chinese with English abstract).
- [36] Reeves, Books. Rock geochemistry in mineral exploration[J]. Handbook of Exploration Geochemistry, 1978, (3): 350–362.
- [37] Graf J L. Rare earth elements as hydrothermal tracers during the formation of massive sulfide deposits in volcanic rocks[J]. Economic Geology, 1977, 72: 527–548.

## REE geochemistry and genesis of the Xiachen fluorite deposit in Tiantai basin, Zhejiang Province

ZOU Hao<sup>1</sup>, FANG Yi<sup>2</sup>, CHEN He-mao<sup>1</sup>, XIAO Guang<sup>1</sup>, XU Zhan-zhang<sup>1</sup>

(1. Institute of Earth Sciences Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;

2. School of Earth Sciences and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China)

**Abstract:** In order to investigate the metallogenic mechanism, ore source and evolution of the Xiachen fluorite deposit in Tiantai basin, the authors studied the geological background as well as trace and REE geochemical characteristics of this ore deposit. The results show that the  $\Sigma$  REE, LREE, MREE and HREE values of wall rocks are much higher than those of ores in the Xiachen fluorite deposit, and REE values of fluorite, quartz and wall rock are characterized by relative enrichment of LREE and depletion of HREE. In addition,  $(La/Yb)_N$  ratios are mostly higher than 8, and REE patterns show a steeply right-oblique feature. Fluorite has weakly positive Eu anomaly and quartz shows weak negative Eu anomaly. Fluorite and quartz have no significant Ce anomaly. According to the La/Ho–Y/Ho diagram, the ore-forming materials of fluorite were derived from the same source, and fluorite and quartz were formed in the same period. The ore-forming material Ca might have been mainly derived from purple sedimentary rocks in Chaochuan Formation, whereas F was probably derived from both Chaochuan Formation sedimentary rocks and Chencai Group metamorphic rocks. According to the geological characteristics of the ore deposit and the Tb/Ca–Tb/La diagram, the authors hold that the ore deposit is an epithermal fault filling–metasomatic type deposit.

**Key words:** Tiantai basin, Zhejiang; Xiachen fluorite deposit; trace element; REE; geochemical characteristics

---

**About the first author:** ZOU Hao, male, born in 1986, Ph.D, lecture, engages in mineral exploration and evaluation; E-mail: zouhao21@sina.com.