

赣中周潭群变质脉体的微量元素及氧同位素 地球化学研究

胡恭任^{1,2,3)}, 刘丛强¹⁾, 章邦桐³⁾, 于瑞莲²⁾

1) 中国科学院地球化学研究所, 贵阳, 550002; 2) 华侨大学环境科学与工程系, 泉州, 362021; 3) 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 210093

内容提要: 笔者等对周潭群沉积变质岩及其中脉体的微量元素、氧同位素地球化学进行了研究, 结果表明, 变质石英脉继承了其围岩的稀土元素及氧同位素地球化学特征, 表明形成石英脉的流体来源于围岩; 脉体的微量元素对 Zr—Hf、U—Th、Nb—Ta 和 Y—Ho 与变质岩有一定的差异, 且有一定的分异, 指示脉体是流体作用的产物。变质流体通过侧向扩散作用形成了周潭群沉积岩中的变质脉体。

关键词: 变质流体; 氧同位素; 稀土元素; 活动性; 周潭群; 赣中

在岩石裂隙中流过的流体发生矿物沉淀会形成脉, 石英脉代表了变质流体在区域尺度上的流动 (Ferry et al., 1991; Walther, 1982, 1990), 它们是与变质作用密切相关的流体的直接产物, 成为研究变质流体来源、演化及其地球化学行为的最佳对象, 在最近的几十年中尤其受到重视。前人主要通过对变质岩中脉体的矿物组合、脉与围岩之间的交代蚀变组合、主元素和 C、H、O 同位素组成的研究, 对变质流体的来源和运移机制提出不同的认识 (Smith et al., 1999; Van Haren et al., 1996)。相对而言, 直接利用脉体的微量元素组成对上述问题进行探讨还远远不够。

周潭群在地质历史上曾是不同地壳类型遇合、交接之地, 集中了地质历史演化旋回的复杂事件, 它位于华夏地块、扬子地块与华南加里东褶皱带的接合部位, 构成相山铀矿田、盛源铀矿田和90号铀矿床的火山岩基底, 对该变质岩系的原岩成分、成因环境及其物源区地质演化、变质流体演化规律的研究, 对进一步认识该区的地壳演化和铀等金属成矿作用有重要意义。目前对周潭群变质岩系的岩石学、矿物学、同位素年代学和地球化学已经进行了详细的研究 (邓国辉, 1997; 胡恭任等, 1997, 1999a, b; 余达淦等, 1999), 但对该变质岩中变质脉体的研究还很少, 本文通过周潭群中变质脉体的微量元素、氧同位素

组成及其与变质围岩的对比研究, 就碎屑沉积岩在角闪岩相变质条件下变质流体的来源、运移以及伴随的微量元素活动进行了探讨。



图1 赣中周潭群变质岩系分布示意图

Fig. 1 A simplified distribution map of metamorphic rocks from the Zhoutan Group in central Jiangxi Province

1—周潭群; 2—新元古代地层; 3—地质界线; 4—断裂; 5—中生代火山岩; 6—加里东期花岗岩; 7—白垩纪红层; 8—扬子地块双桥山群; 9—采样位置
1—Zhoutan Group; 2—Neoproterozoic stratum; 3—geological boundary; 4—fault; 5—Mesozoic volcanic rocks; 6—Caledonian granite; 7—Kalgan red bed; 8—Yangtze block Shuangqiaoshan Group; 9—sampling position

注: 本文为科技部攀登计划预选项目 (编号95-预-39)、南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室开放基金资助项目的成果。

收稿日期: 2005-09-06; 改回日期: 2006-02-18; 责任编辑: 郝祥国。

作者简介: 胡恭任, 男, 1966年生。副研究员, 博士。主要从事资源环境与同位素地球化学方面的教学与科研工作; 通讯地址: 362021, 福建省泉州市华侨大学环境科学与工程系; 电话: 0595-22693981; Email: grhu@hqu.edu.cn。

1 地质背景

周潭群变质岩系是江西中部地方性岩石单位, 主要分布于浙赣线南侧的铅山鹅湖, 弋阳周潭、慈竹, 余江马荃、乐安相山, 平面上呈近 NE 向的带状展布(图1), 其原岩形成时代为中元古代(邓国辉, 1997; 胡恭任等, 1997, 1999a, b; 余达淦等, 1999), 变质后的岩石类型可以概括为两大类: ①片岩类, 以石榴云母片岩(图2-1)、十字石榴云母片岩、石英片岩为主, 次有夕线石榴云母片岩; ②变粒岩类, 主要为

云母斜长变粒岩(图2-2)。此外, 在石榴云母片岩中局部有呈夹层发育, 厚度数米到数十米的斜长角闪片岩。根据矿物组合及斜长石—角闪石、石榴子石—黑云母和石榴子石—十字石等共生矿物对地质温压计计算结果, 周潭群变质程度最高已达角闪岩相, 变质峰期的温度和压力范围分别为 $510\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.50\sim 0.65\text{ GPa}$ (胡恭任等, 2004)。一些地方岩石强烈构造置换和高度分异, 发育层间塑性流变, 原生变晶矿物分离和流体迁移明显, 长英质脉体沿片麻理方向密集(图2-3), 呈分层, 分布且极不稳定。脉

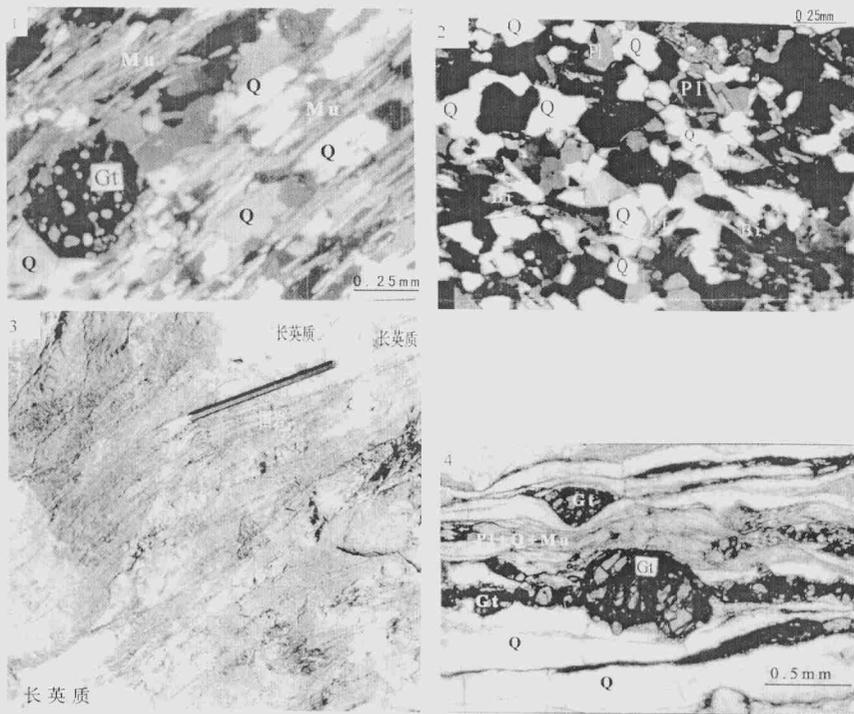


图2 周潭群中主要岩类的产出特征

Fig. 2 The occurrence characteristics of the major petrographic category in Zhoutan Group

1—变质围岩—石榴云母石英片岩(样品 X50, (+), 石榴子石具瓣状变晶结构); 2—变质围岩—云母斜长变粒岩(样品 Y61, (+)); 3—变质围岩与长英质脉体的产状关系(铅笔长度为13cm, 据范洪海改编); 4—长英质脉体的矿物组成(样品 X894, (+)) Q—石英; Bi—黑云母; Mu—白云母; Gt—石榴子石; Pl—斜长石

1—metamorphic host rocks—garnet—mica—quartz schist (sample X50, (+), garnet presents diablastic texture); 2—metamorphic host rocks—mica—plagioclase granulite (sample Y61, (+)); 3—The occurrence relationship between metamorphic host rocks and felsic veins; 4—The mineral association of felsic veins (sample X894, (+)) (Q, quartz; Pl, plagioclase; Bi, biotite; Mu, muscovite; Gt, garnet)

体宽度为 0.05~0.5 m, 长度为 0.5 m 到数十米不等。部分脉体中见有石榴子石、白云母等与变质围岩相同的矿物(图 2-4)。

2 样品及分析方法

本次研究的样品采自乐安相山北部和宜黄黎溪两地, 两地的直线距离约为 40 km。相山北部变质围岩主要为石榴云母石英片岩、石英片岩, 发育的脉体有长英质脉、石英脉, 宜黄黎溪的变质围岩主要为云母斜长变粒岩, 发育的脉体主要为长英质脉。两地变质围岩和脉体的岩性及其矿物组合详见表 1。

岩石主元素用湿化学法测定, 分析精度优于 2%~3%; 稀土等微量元素采用 HF+HNO₃ 密闭溶样, 在 ICP-MS 上测定, 分析时外加标准样 GBPG-1、AMH-1 作为质量控制, 稀土元素的精度优于 5%, 其余元素优于 10%。对于微量元素含量偏低的样品(石英脉), 通过增加溶样量和缩小滴定液体积进行预富集处理。

对于氧同位素测定, 全岩样品采用无污染玛瑙球磨技术直接碎至过 200 目筛, 单矿物则破碎到自然粒度后, 利用磁法、重液等选矿技术, 并配合双目镜手选方法进行单矿物分离, 纯度大于 98%。全岩和单矿物氧同位素采用常规 BrF₃ 法提取样品中的氧, 并用碳棒将其转化成 CO₂ 进行质谱测定(中国地质科学院地质研究所, 1992)。氧同位素比值在南京大学

表 1 研究样品的岩性及其矿物组合

Table 1 Rock types and their mineral assemblages of the samples in this study

采样地点	采样对象	岩石名称	主要矿物组合	样品号
相山北部	变质围岩	石榴云母石英片岩	Gt+Mu+Bi+Q+Pl	X50
		十字石榴云母片岩	St+Gt+Mu+Bi+Q+Pl	X97、X45
		含角闪云母石英片岩	Hb+Mu+Bi+Q	X56-6、G4
		二云母石英片岩	Mu+Bi+Q	G3
	脉体	长英质脉	Q+Pl+Mu±Gt±Bi	X894、X970
		石英脉	Q	X568、X569
宜黄黎溪	变质围岩	云母斜长变粒岩	Mu+Bi+Pl+Q±Gt	Y61
		夕线云母片岩	Sil+Mu+Bi+Q	Y60
	脉体	长英质脉	Q+Pl+Mu±Gt	Y6

注: Q—石英; Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Bi—黑云母; Mu—白云母; Gt—石榴石; St—十字石; Hb—角闪石; Sil—夕线石。

内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室 MAT-252 气体质谱计上测定, 结果记为 δ¹⁸O (相对于 SMOW)。样品的重现性分析得到 δ¹⁸O 值误差优于 ±0.2‰。

3 分析结果

3.1 主元素

表 2 是变质围岩和长英质脉体的主元素测定结果, 该结果充分显示了所测定岩石的矿物组成特征。石英片岩和变粒岩具相对高的 SiO₂ (>67%)、Na₂O 和较低的 Fe₂O₃+FeO, 因其原岩是长英质碎屑岩, 其组成矿物以石英、长石为主。云母片岩因含较多的云母类矿物而具相对高的 Al₂O₃、Fe₂O₃+FeO、MgO 和相对低的 SiO₂、Na₂O。长英质脉的主元素组成主要是 SiO₂ (>70%)、Al₂O₃、Na₂O 及少量的 K₂O, 该特征与石英和斜长石是其主要组成矿物的特征相一致。CaO 在绝大部分脉体中的含量较低(0.30%~

表 2 变质围岩和长英质脉的主元素组成(%)

Table 2 Major element compositions(%) of metamorphic host rocks and felsic veins

采样地点	样号	岩性	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	总量
相山北部	X50	片岩	69.44	0.49	13.99	0.55	4.50	0.19	1.87	2.62	2.96	1.83	0.87	1.65	99.39
	X894	长英质脉	89.74	0.002	3.25	1.60	0.40	0.02	0.60	0.70	0.43	0.52	0.93	1.80	99.99
	X97	片岩	60.50	0.37	14.40	3.71	4.99	0.13	2.90	1.10	1.00	3.88	0.80	5.61	99.39
	X970	长英质脉	72.92	0.004	16.20	0.90	0.40	0.20	0.80	4.07	2.08	0.69	1.50	0.20	99.77
	X45	片岩	68.89	0.68	14.09	1.90	4.45	0.06	2.51	0.77	1.29	2.94	0.05	1.40	99.03
	X56-6	片岩	76.07	0.57	9.85	1.57	2.66	0.14	1.22	2.34	2.66	0.64	0.08	1.30	99.08
	X568	石英脉	95.60	0.02	0.10	0.60	0.18	0.01	0.12	0.31	0.12	0.06	0.75	1.75	99.62
	G3	片岩	61.67	0.73	17.89	2.05	5.55	0.08	2.61	1.73	1.15	3.55	0.09	2.00	99.10
	G4	片岩	75.11	0.77	10.85	1.67	2.56	0.15	1.32	2.44	2.56	0.94	0.08	1.40	99.85
	X569	石英脉	95.56	0.001	0.09	0.65	0.15	0.01	0.10	0.30	0.13	0.07	0.73	1.74	99.53
	宜黄黎溪	Y61	变粒岩	67.45	0.18	15.35	2.50	3.00	0.09	2.30	1.30	3.22	2.19	0.93	1.40
Y6		长英质脉	74.20	0.01	13.45	1.10	0.80	0.01	0.60	0.95	4.75	1.45	0.85	1.25	99.42
Y60		片岩	60.12	0.40	18.10	2.16	5.54	0.09	3.10	0.80	1.10	4.60	0.83	3.02	99.86

分析者: 中国科学院地球化学研究所李荪蓉。

0.95%),是脉体中的长石属于钠长石($An_{11\sim 18}$) (胡恭任等,2004)的体现,但在个别脉体中的含量较高(4.07%),与该脉体中存在石榴子石有关。

3.2 微量元素

从岩石稀土元素(表3)的球粒陨石(Taylor et al., 1977)标准化分布模式(图3)和有关参数特征(表3,图3)可以看出,石英脉体与各自围岩间的稀土元素特征基本一致,稀土元素分布模式与其变质围岩基本平行,表现为左高右低的轻稀土元素相对富

集的特点,但长英质脉体的稀土元素分布模式与其变质围岩有一定的差异,表现为重稀土元素的相对富集(图3中的 X894、Y6),同时都具有一定的铈异常(图3);该特征在 $(La/Yb)_N-\delta Eu$ 变异图上显示出脉体与其围岩数据点在一定程度上重叠性(图4)。这些特征暗示了脉体对其变质围岩稀土元素组成特点的继承性,即两者间的成因联系。

在元素比值 U/Th 与 Zr/Hf , Nb/Ta 与 Zr/Hf , Y/Ho 与 Zr/Hf 的变异图上,变质脉体的数据点范

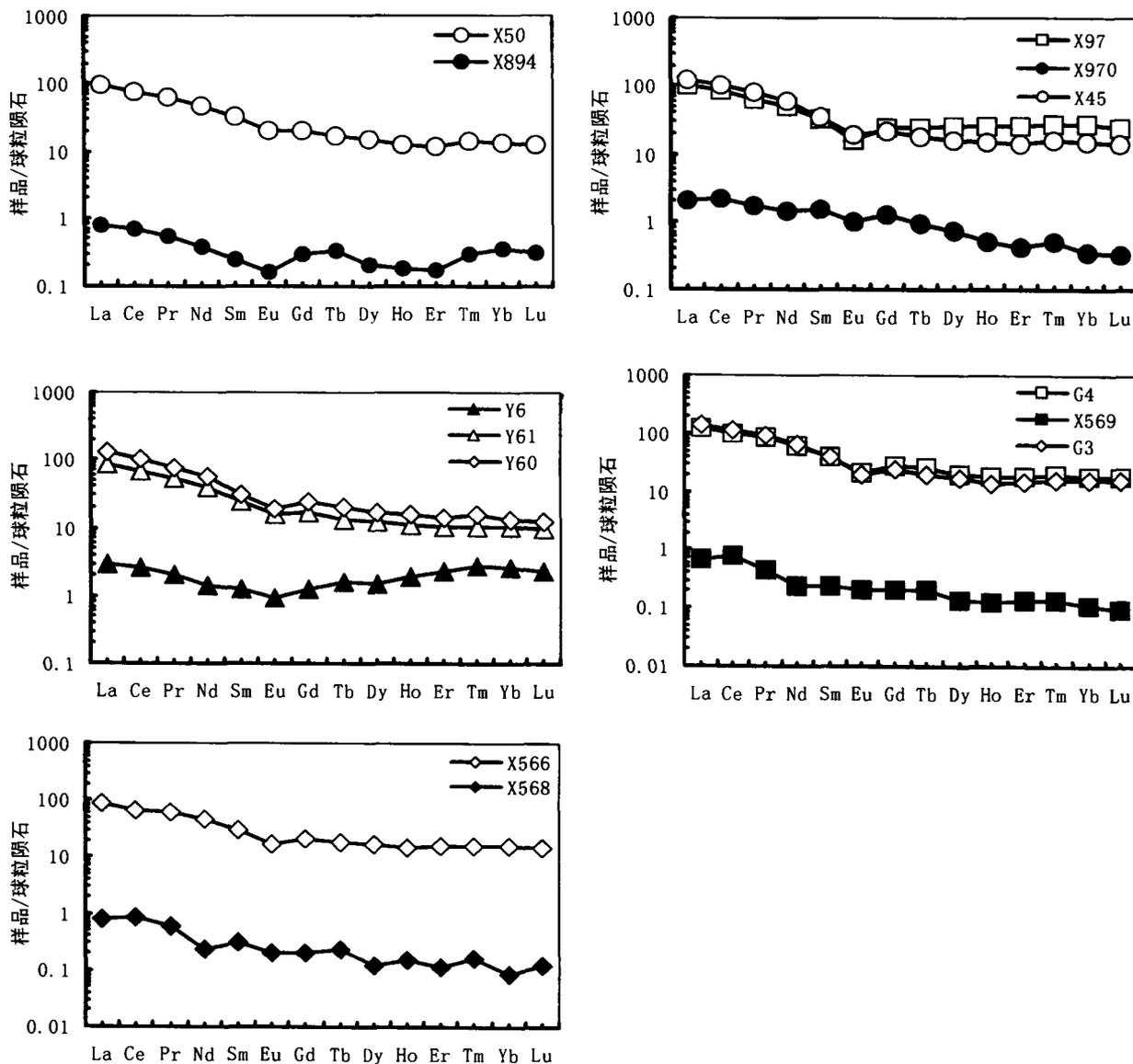


图3 变质脉体及其围岩的球粒陨石(据 Taylor et al., 1977)标准化稀土元素分布模式

Fig. 3 Chondrite-normalize REE patterns of metamorphic veins and their host rocks(after Taylor et al., 1977)

图中分布曲线按单个脉体(实心符号)及其直接围岩(空心符号)进行组合

The distributed curves of each vein(solid sign) and its immediate host rocks(hollow sign) were included in the figure

表 3 变质脉体及其变质围岩的微量元素组成 ($\mu\text{g/g}$)Table 3 Trace element compositions ($\mu\text{g/g}$) of metamorphic veins and their host rocks

样号	X50	X894	X45	X970	X97	X56-6	X568	G3	X569	G4	Y61	Y6	Y60
岩性	S	FV	S	FV	S	S	QV	S	QV	S	G	FV	S
Li	36.76	0.443	39.35	1.819	102.7	8.712	0.785	3.554	0.660	8.734	52.84	8.109	77.40
Sc	7.692	—	7.103	—	21.99	5.291	—	7.227	—	3.124	11.22	—	19.18
V	64.07	—	63.45	—	118.5	58.69	0.929	107.9	1.397	57.97	83.98	—	138.7
Cr	135.4	—	196.9	—	94.09	45.72	—	104.4	—	90.53	74.12	1.643	112.7
Co	11.37	0.292	13.81	0.108	26.69	7.913	1.778	20.67	1.496	17.29	15.23	0.936	23.56
Ni	21.98	2.131	31.18	—	49.62	16.77	1.161	45.31	0.717	32.04	36.39	1.374	64.65
Cu	35.71	—	20.06	14.57	66.80	51.11	72.65	11.18	65.27	9.365	23.93	4.983	36.56
Zn	103.3	—	73.34	—	189.1	114.3	6.431	112.1	9.308	154.7	97.61	0.015	131.8
Ga	19.44	0.343	10.28	0.666	24.27	11.54	0.180	17.61	0.167	12.08	15.38	5.948	24.44
Ge	2.576	1.222	1.635	1.093	2.892	1.632	0.414	1.931	0.474	2.186	1.504	1.046	1.791
As	3.003	—	10.92	—	—	3.003	—	2.727	—	2.183	—	—	—
Rb	122.7	1.618	85.62	2.043	183.4	38.87	1.602	24.02	1.345	45.78	81.35	27.46	166.4
Sr	162.5	4.417	143.6	26.51	71.65	105.4	2.599	103.8	2.012	84.13	210.2	86.92	108.8
Y	25.86	0.347	28.30	0.940	49.02	29.35	0.188	28.12	0.177	29.99	20.53	4.589	27.14
Zr	118.6	0.904	201.1	2.205	146.9	128.4	3.865	197.1	3.870	122.7	127.5	1.821	177.4
Nb	12.54	0.118	9.890	0.155	14.29	9.133	0.187	14.08	0.115	10.85	11.78	0.268	17.31
Mo	0.787	—	0.847	—	0.052	6.777	0.163	1.310	0.136	0.661	0.134	0.019	0.349
Cd	0.063	—	0.034	—	0.109	0.194	—	0.219	—	0.049	0.045	—	0.068
Sn	2.709	—	2.154	—	4.667	2.341	—	7.249	—	1.886	2.598	0.531	3.746
Sb	0.585	—	1.461	—	—	2.553	—	0.353	—	0.307	—	—	—
Cs	11.85	0.146	7.174	0.142	16.24	2.276	0.182	1.893	0.163	4.633	6.811	4.206	12.31
Ba	196.0	6.827	303.6	3.912	288.0	150.9	4.183	161.8	3.494	113.9	379.6	113.4	112.2
Hf	4.179	0.022	6.577	0.070	4.899	4.191	0.123	7.085	0.111	4.354	4.186	0.045	5.711
Ta	1.176	0.007	0.804	0.009	1.077	0.748	0.009	1.229	0.011	0.870	0.761	0.011	1.133
W	2.074	—	1.240	—	1.229	0.939	—	2.238	—	3.450	0.203	—	1.910
Pb	62.18	—	15.44	4.807	28.99	132.8	2.447	10.94	2.092	15.01	19.85	5.936	24.80
Th	12.03	0.070	15.15	0.206	12.46	10.91	0.062	18.47	0.053	11.23	7.033	0.160	11.15
U	2.919	0.040	2.852	0.067	2.343	2.659	0.040	3.455	0.040	1.759	1.467	0.067	2.219
Zr/Hf	28.38	41.09	30.57	31.50	29.99	30.64	31.42	27.82	34.86	28.18	30.46	40.47	31.06
U/Th	0.243	0.571	0.188	0.325	0.188	0.244	0.645	0.187	0.755	0.157	0.209	0.419	0.199
La	29.23	0.243	39.04	0.656	32.11	27.17	0.252	42.63	0.216	38.70	26.02	0.941	40.52
Ce	61.48	0.553	81.36	1.762	69.08	53.52	0.684	90.22	0.632	80.79	52.90	2.041	81.06
Pr	7.105	0.063	9.299	0.202	7.356	7.162	0.068	10.31	0.051	10.10	6.020	0.236	8.955
Nd	27.11	0.222	34.55	0.823	29.26	27.39	0.134	39.43	0.139	36.81	23.33	0.863	33.60
Sm	6.113	0.048	6.556	0.281	6.259	5.709	0.060	7.417	0.045	7.800	4.567	0.237	5.899
Eu	1.474	0.012	1.318	0.070	1.128	1.252	0.015	1.373	0.148	1.480	1.147	0.068	1.342
Gd	5.256	0.077	5.520	0.325	6.019	5.300	0.053	6.402	0.053	7.160	4.209	0.330	6.110
Tb	0.795	0.016	0.883	0.046	1.167	0.893	0.011	0.979	0.010	1.290	0.654	0.076	0.972
Dy	4.723	0.067	5.217	0.238	8.244	5.622	0.040	5.440	0.045	6.400	4.082	0.502	5.451
Ho	0.878	0.013	1.049	0.038	1.813	1.000	0.011	1.040	0.009	1.360	0.782	0.137	1.135
Er	2.538	0.037	2.951	0.089	5.353	3.278	0.025	3.081	0.028	3.910	2.216	0.492	2.909
Tm	0.414	0.009	0.480	0.015	0.797	0.488	0.005	0.485	0.004	0.590	0.315	0.080	0.472
Yb	2.810	0.073	3.081	0.075	5.500	3.258	0.018	3.270	0.022	3.780	2.137	0.540	2.739
Lu	0.406	0.010	0.460	0.011	0.765	0.475	0.004	0.499	0.003	0.580	0.305	0.072	0.393
TREE	150.3	1.472	191.7	4.631	174.9	142.6	1.380	212.6	1.405	200.8	128.7	6.770	191.6
LREE	132.5	1.170	172.1	3.794	145.2	122.2	1.213	191.4	1.231	175.7	114.0	4.541	171.4
HREE	17.82	0.302	19.64	0.837	29.66	20.40	0.167	21.20	0.174	25.07	14.70	2.229	20.18
L/H	7.435	3.874	8.763	4.533	4.896	5.990	7.263	9.028	7.075	7.008	7.755	2.037	8.493
Sm/Nd	0.225	0.216	0.190	0.341	0.214	0.208	0.448	0.188	0.324	0.212	0.196	0.275	0.176
La/Yb	10.40	3.329	12.67	8.747	5.838	8.339	14.00	13.04	9.818	10.24	12.18	1.743	14.79
Y/Ho	29.45	26.69	26.97	24.74	27.04	27.03	17.09	26.13	19.67	22.05	26.25	33.50	23.91
δEu	0.803	0.607	0.653	0.715	0.568	0.703	0.822	0.595	0.936	0.612	0.808	0.751	0.678
δCe	1.003	1.051	0.976	1.138	1.057	0.902	1.229	0.985	1.416	0.961	0.994	1.018	0.964
La/Yb*	6.869	2.198	8.563	5.776	3.855	5.507	9.244	8.810	6.483	6.760	8.040	1.151	9.997
La/Sm*	2.915	3.086	3.748	1.423	3.127	2.901	2.560	3.618	2.926	3.024	3.473	2.420	4.324
Gd/Yb*	1.502	0.847	1.452	3.480	0.879	1.306	2.365	1.587	1.935	1.521	1.582	0.491	1.808

分析者:中国科学院地球化学研究所漆亮。—表示未测出。岩性代号的含义: S. 片岩; G. 变粒岩; QV. 石英脉; FV. 长英质脉

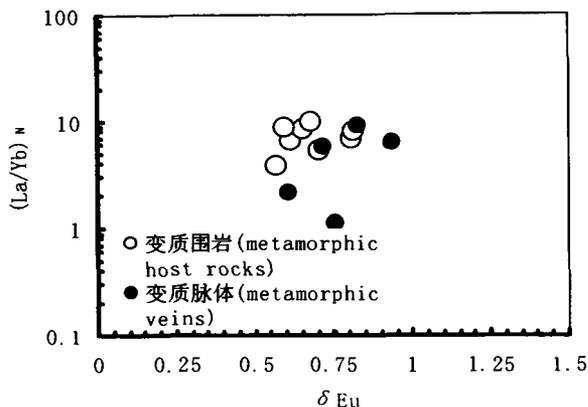


图4 变质脉体及其围岩的 $(La/Yb)_N-\delta Eu$ 变异图
Fig. 4 $(La/Yb)_N$ vs. δEu variation diagram of the metamorphic veins and their host rocks

围不同于变质围岩(图5、图6、图7),其中变质围岩的U/Th、Nb/Ta、Y/Ho和Zr/Hf值在很小的范围内变化且与球粒陨石的相应比值(Thompson, 1982)很接近,表明上述元素在岩石中的行为受电荷和半径控制(Liu C Q et al., 1999)。而脉体中的上述元素对的比值有一定的变化,显示脉体中元素U—Th、Nb—Ta、Y—Ho和Zr—Hf之间发生了一定程度的分异,这种离子电荷相同、半径相近的元素对之间的分异是它们与流体形成配合物的行为存在差异造成的(Bau, 1996)。因此,上述微量元素组成特征表明,脉体是流体作用的产物。

3.3 氧同位素

变质脉体、变质围岩及其中矿物的氧同位素组成列于表4,矿物对氧同位素温度采用Zheng Y F

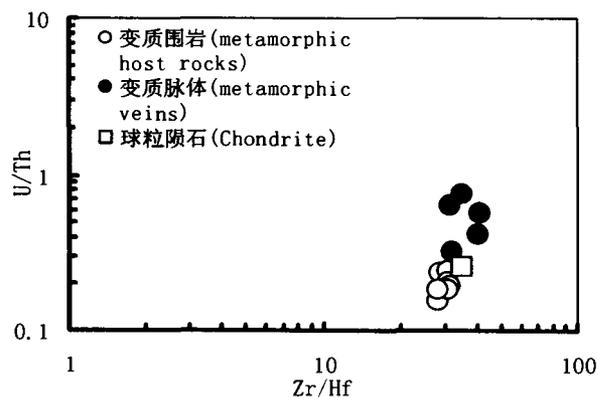


图5 变质脉体及其围岩的U/Th—Zr/Hf变异图
Fig. 5 U/Th vs. Zr/Hf variation diagram of the metamorphic veins and their host rocks

(1993a, 1993b)的理论分馏曲线进行计算,为尽量减少脉体中的残余成因矿物,选取远离变质围岩脉体中心部分的样品进行分选测试。

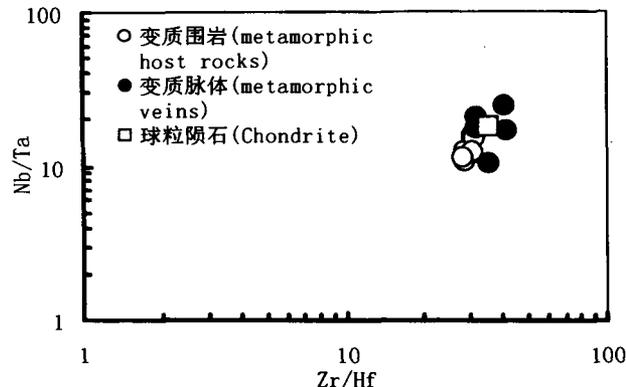


图6 变质脉体及其围岩的Nb/Ta—Zr/Hf变异图
Fig. 6 Nb/Ta vs. Zr/Hf variation diagram of the metamorphic veins and their host rocks

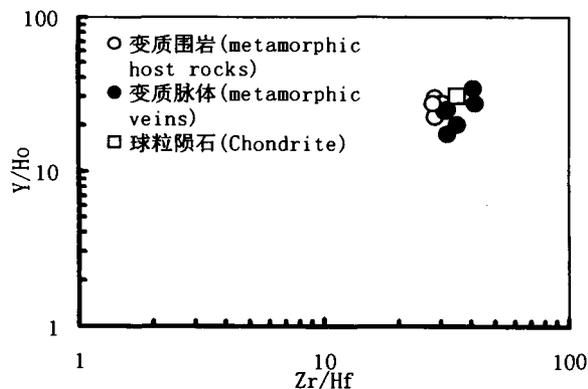


图7 变质脉体及其围岩的Y/Ho—Zr/Hf变异图
Fig. 7 Y/Ho vs. Zr/Hf variation diagram of the metamorphic veins and their host rocks

由表4、表5可知,脉石英及其中矿物与变质围岩中石英及其中矿物的氧同位素组成非常接近,脉中矿物对氧同位素温度与变质围岩中矿物对氧同位素温度也比较接近,脉及变质围岩中矿物之间的氧同位素分馏(石英>白云母>石榴子石>黑云母)符合平衡分馏顺序,表明流体与变质围岩之间基本达到同位素平衡,脉石英 $\delta^{18}O$ 与变质围岩中石英 $\delta^{18}O$ 之间呈正相关趋势(图8,相关系数 $r=0.95434$),表明脉石英氧同位素组成对变质围岩具有强烈的继承性,成脉流体应该来源于变质围岩。

表 4 变质脉体及其变质围岩的氧同位素组成

Table 4 Oxygen isotopic compositions of metamorphic veins and their host

样品产地	样号	变质脉体中矿物 $\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$				样号	围岩及其中矿物 $\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$						
		Q	Mu	Gt	Bi		全岩	Q	Mu	Gt	Bi	St	Hb
相山北部	X894	15.40	13.18	10.87		X50	13.70	15.12	12.69	10.44	10.03		
	X970	15.30	13.04	11.89	10.41	X97		14.55	12.52	11.39	10.30	11.20	
	X568	13.94				X56-6	12.68	13.56					9.13
	X569	14.94				G4		14.68					
宜黄黎溪	Y6	13.57	11.29	10.47		Y61		12.41		9.68	8.62		

分析者:南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室黄耀生。Q—石英;Bi—黑云母;Mu—白云母;Gt—石榴子石;St—十字石;Hb—角闪石。

表 5 变质脉体及其变质围岩矿物对的 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 值与氧同位素平衡温度

Table 5 The Oxygen isotope equilibrium temperature and $\Delta\delta^{18}\text{O}$ values of mineral pairs from metamorphic veins and their host

样品产地	样号	变质脉体			样号	变质围岩					
		矿物对	$\Delta\delta^{18}\text{O}$	$t(\text{°C})$		矿物对	$\Delta\delta^{18}\text{O}$	$t(\text{°C})$	矿物对	$\Delta\delta^{18}\text{O}$	$t(\text{°C})$
相山北部	X894	Q-Mu	2.22	610	X50	Q-Mu	2.43	579	Q-Bi	5.09	532
		Q-Gt	4.53	524		Q-Gt	4.68	511			
	X970	Q-Mu	2.26	604	X97	Q-Mu	2.03	642	Q-Bi	4.25	599
		Q-Gt	3.41	646		Q-Gt	3.16	654	Q-St	3.35	750
		Q-Bi	4.89	547	X56-6	Q-Hb	4.43	646			
	宜黄黎溪	Y6	Q-Mu	2.28	633	Y61	Q-Gt	2.73	754	Q-Bi	3.79
Q-Gt			3.10	691							

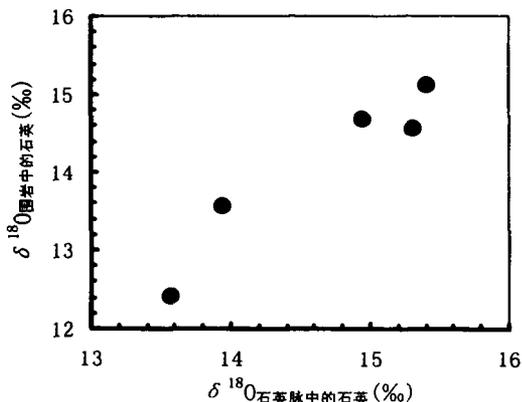


图 8 变质脉体与变质围岩之间的氧同位素相关关系图
Fig. 8 The oxygen isotopic correlation diagram of the metamorphic veins and their host rocks

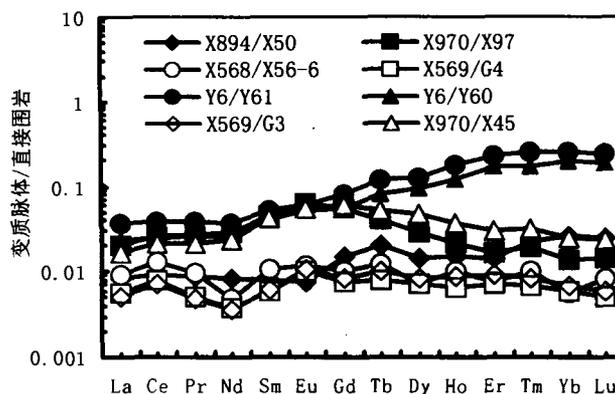


图 9 变质脉体/直接围岩的稀土元素分布模式
Fig. 9 Immediate host rock-normalized REE patterns of metamorphic vein

4 讨论

4.1 变质脉体的成因

通过对不同变质地体中石英脉的研究,形成石英脉的流体来源主要分为两种:来源于变质围岩的外部 and 来源于脉体附近的围岩(Bau, 1996; Yardley, 1992; Ague, 1994)。如果流体来源于外部,其流动机制则为隧道状的流体迁移(channelized fluid

transport),脉体是作为流体流动的通道。这种情况因外部流体与脉体的直接围岩间化学组成上的不平衡,所形成的脉体与围岩之间通常发育一个可以识别的交代蚀变带,该带有矿物学和氧同位素上的不平衡现象(Yardley, 1992; Ague, 1994)。

本文研究的周潭群中变质脉体与变质围岩间未见有不平衡的交代蚀变带,脉边缘变质围岩的矿物组合和石英含量与远离石英脉的变质围岩内部并无

显著区别,脉体与其变质围岩的界限清楚,石英脉与其变质围岩的稀土元素特征非常接近,唯一的差异是稀土元素总量不同;长英质脉体稀土元素组成特征与其围岩有一定的差别,表现为重稀土元素的相对富集;脉石英 $\delta^{18}\text{O}$ 与变质围岩中石英 $\delta^{18}\text{O}$ 之间呈正相关趋势(图8,相关系数 $r=0.95434$),表明脉石英氧同位素组成对变质围岩具有强烈的继承性。因此所研究的周潭群中变质脉体不属于上述的第一种情况,而应该是邻近脉体的岩石变质过程中所形成的变质流体通过局部的扩散作用(diffusion)进入岩石裂隙中形成的。由于流体来源于变质岩,其化学组成不仅与变质岩平衡,而且严格受变质岩所制约。

4.2 稀土元素的活动

稀土元素在变质作用过程中是否具有活动性,是变质岩石学和地球化学研究的重要课题之一,目前对该问题的认识如下:①不活动(Grauch,1989;于学元等,1996);②稀土元素作为元素组整体活动(Hellman et al.,1979;Nystrom,1984);③选择性的活动,具体有轻稀土元素的活动(Hellman et al.,1979;Nystrom,1984;Wood et al.,1976;Sun,1978;Wear,1981)或重稀土元素的活动(Stable et al.,1987)。以上大量实例研究表明,稀土元素在变质作用过程中的地球化学行为是一个复杂的问题,其活动与否受到变质岩石矿物组合、流体组成和流体/岩石比值等多种因素制约(Grauch,1989)。

大量的研究证实,泥砂质沉积岩发生区域进变质作用的过程实际上是一个脱挥发份的过程,该过程中形成了以 H_2O 和 CO_2 为主的变质流体。本文所研究的周潭群变质岩即属于该种情况,上述变质岩中发育的同变质脉体是变质流体的直接产物。脉体中大量的属于 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 体系的原生气-液包裹体的发育也为此提供了直接的证据(胡恭任等,2005)。由此,根据脉体含一定量的稀土元素这一事实可以推断,周潭群原始沉积岩发生变质的过程中,稀土元素具有一定程度的活动性,而且上述稀土元素特征显示出长英质脉体与石英脉体的稀土元素活动性特点不同,其中石英脉体具有较低的稀土元素含量($1.380 \times 10^{-6} \sim 1.405 \times 10^{-6}$)、高的 L/H 值(7.075 ~ 7.263)和较轻的铕亏损($\delta\text{Eu} = 0.822 \sim 0.936$),脉体在稀土元素特征上对其变质围岩(云母石英片岩)有强烈的继承性(图3中的 X568、X569),因此,该处稀土元素是整体活动的,它们随着变质流体自变质岩中发生活化迁移的量较低,在变质脉体/直接围岩的稀土元素分布模式图上表现为较平缓的

曲线(图9中的 X568、X56-6、X569、G3、X569、G4)。

长英质脉体(主要成分为石英、斜长石,少量石榴子石、白云母,个别样品含有黑云母)的情况较为复杂,稀土元素含量变化较大($1.472 \times 10^{-6} \sim 6.770 \times 10^{-6}$),较低的 L/H 值(2.037 ~ 4.533)和中等的铕亏损($\delta\text{Eu} = 0.607 \sim 0.751$),长英质脉体中石榴子石、白云母的存在(样品 Y6、X894),稀土元素组成特征与其围岩有一定的差别,表现为重稀土元素相对富集(图3中的 X894、Y6),其变质脉体与直接围岩的稀土元素分布模式也与石英脉体的差别较大(图9中的 X894/X50、Y6/Y61、Y6/Y60)。鉴于长英质脉体稀土元素含量、稀土元素组成特征和长英质脉体与直接围岩的稀土元素分布模式变化较大,因此,长英质脉体的组成并不总能完全反映流体活动的特征,而石英脉体的上述稀土元素特征更为稳定,能更好地反映流体活动过程中的稀土行为。

5 结论

(1) 周潭群中变质脉体边缘变质围岩的矿物组合和石英含量与远离石英脉的变质围岩内部并无显著区别,脉体与其变质围岩的界限清楚,石英脉与其变质围岩的稀土元素特征非常接近,长英质脉体稀土元素组成特征与其围岩有一定的差别,表现为重稀土元素的相对富集;变质脉体是邻近脉体的岩石变质过程中所形成的变质流体通过局部的扩散作用进入岩石的裂隙中形成的。

(2) 周潭群原始沉积岩发生变质的过程中,稀土元素具有一定程度的活动性,脉体在稀土元素特征上对其变质围岩有强烈的继承性。

(3) 脉石英及其中矿物与变质围岩中石英及其中矿物的氧同位素组成非常接近,脉中矿物对氧同位素温度与变质围岩中矿物对氧同位素温度也比较一致,脉石英 $\delta^{18}\text{O}$ 与变质围岩中石英 $\delta^{18}\text{O}$ 之间呈较好的正相关趋势,脉石英氧同位素组成对变质围岩具有强烈的继承性,成脉流体应该来源于变质围岩。

致谢:野外工作得到核工业华东地质局261大队范洪海及东华理工学院余达渝教授的大力支持和协助;中国科学院地球化学研究所李荪蓉高级工程师和漆亮高级工程师分别测定了样品的主元素和微量元素组成,南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室黄耀生高级工程师测定了样品的氧同位素组成,谨致谢忱。

参 考 文 献 / References

- 邓国辉. 1997. 东乡瑶圩—余江马基地区斜长角闪岩特征及其地质意义. *江西地质科技*, 24(1):21~24.
- 胡恭任, 章邦桐, 王长华. 1997. 赣中相山新元古代变质岩的首次确定. *中国区域地质*, 16(2):222~224.
- 胡恭任, 章邦桐, 于瑞莲. 1999. 赣中变质岩带的 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素年代研究. *地质论评*, 45(2):129~134.
- 胡恭任, 刘丛强, 章邦桐, 等. 2004. 赣中周潭群石榴子石、斜长石和黑云母微区化学成分特征及其地球动力学意义. *岩石矿物学杂志*, 23(4):337~345.
- 胡恭任, 刘丛强, 陈培荣, 等. 2005. 赣中变质岩带变质流体地球化学特征及流体来源. *矿物学报*, 25(3):268~274.
- 余达淦, 艾桂根, 黄国夫, 等. 1999. 江西周潭群同位素年龄特征及其地质意义. *地球学报*, 20(2):195~200.
- 于学元, 郑作平, 牛贺才. 1996. 八卦庙大型金矿床稀土元素地球化学研究. *地球化学*, 25(2):140~149.
- 中国地质科学院地质研究所. 1992. 稳定同位素分析方法研究进展. 北京:北京科学技术出版社, 50~60.
- Ague J J. 1994. Mass transfer during Barrovian metamorphism of pelites, south-central Connecticut: Channelized fluid flow and the growth of staurolite and kyanite. *Am. J. Sci.*, 294: 1 061~1 134.
- Bau M. 1996. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems; Evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect. *Contrib. Mineral Petrol.*, 123: 323~339.
- Deng Guohui. 1997. Characteristics of amphibolite in Yaoxu, Dongxiang—Maquan, Yujiang region and its Significance. *Geological Science and Technology of Jiangxi*, 24(1):20~24 (in Chinese with English abstract).
- Ferry J M, Dipple G M. 1991. Fluid flow, mineral reaction and metasomatism. *Geology*, 19:211~214.
- Grauch B I. 1989. Rare earth elements in metamorphic rocks. *Rev Mineral*, 21: 147~167.
- Hellman P L, Smith R E, Henderson P. 1979. The mobility of the rare earth elements; Evidence and implications from selected terranes affected by burial metamorphism. *Contrib Mineral Petrol*, 71: 23~44.
- Hu Gongren, Zhang Bangtong, Wang Changhua. 1997. First determination of the Neoproterozoic metamorphic rocks in Xiangshan, central Jiangxi Province. *Regional geology of China*. 16(2), 222~224 (in Chinese with English abstract).
- Hu Gongren, Zhang Bangtong, Yu Ruilian. 1999a. A study on Sm-Nd and Rb-Sr isochron ages of the Central Jiangxi metamorphic belt. *Geological Review*, 45(2):129~134 (in Chinese with English abstract).
- Hu Gongren, Zhang Bangtong, Yu Ruilian. 1999b. Petrology, age and geochemistry of the proterozoic amphibolites from Xiangshan, central Jiangxi Province. *Chinese Journal of Geochemistry*, 18(2):139~149.
- Hu Gongren, Liu Congqiang, Zhang Bangtong et al. 2004. Microarea chemical compositions of garnet, plagioclase and biotite from Zhoutan Group in central Jiangxi and its geological dynamic significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*. 23(4):337~345 (in Chinese with English abstract).
- Hu Gongren, Liu Congqiang, Chen Pei-rong et al. 2005. Geochemistry and origin of metamorphic fluids from the metamorphic belts in central Jiangxi province. *Acta Mineralogica Sinica*. 25(3):268~274 (in Chinese with English abstract).
- Liu C Q, Tang H F. 1999. Redistribution of rare-earth elements (REE) during metamorphism and its indicative significance for fluid processes; A study on the trace element composition of the Xingzi Group metamorphic rocks in the Luskan area, SE China. *Science in China (Series D)*, 42(6): 646~654.
- Nystrom J O. 1984. Rare earth element mobility in vesicular lava during low-grade metamorphism. *Contrib. Mineral Petrol.*, 88: 328~331.
- Smith M P, Yardley B W D. 1999. Fluid evolution during metamorphism of the Otago Schist, New Zealand: (1) Evidence from fluid inclusions. *J Metamorph Geol*, 17: 173~186.
- Stable H J, Raith M, Hoerns S, et al. 1987. Element mobility during incipient granulite formation at Kabbaldurga, southern India. *J. Petrol.*, 28: 803~834.
- Sun S S, Nesbitt R W. 1978. Petrogenesis of Archean ultrabasic and basic, volcanics: Evidence from rare earth elements. *Contrib. Mineral Petrol.*, 65: 301~325.
- Taylor S R, Gorton M P. 1977. Geochemical application of spark source mass spectrograph-III: Element sensitivity, precision and accuracy. *Geochim Cosmochim Acta*, 41: 1 375~1 380.
- Thompson R N. 1982. Mesotatism of the British Tertiary Volcanic Province. *Scott J Geol*, 18:49~107.
- Van Haren J L M, Ange, J J, Rye D M. 1996. Oxygen isotope record of fluid infiltration and mass transfer during regional metamorphism of polydeformed schist, Connecticut, USA. *Geochim Cosmochim Acta*, 60: 3 487~3 504.
- Walther J V, Orville P M. 1982. Rates of metamorphism and volatile production and transport in regional metamorphism. *Contrib. Mineral Petrol.*, 79:252~257.
- Walther J V. 1990. Fluid dynamics during progressive regional metamorphism. In: Bredehoeft J D, Norton D L. eds. *The Role of Fluids in Crustal Processes*. Washington D C: National Academy Press, 64~70.
- Wear B L, Tarney J. 1981. Chemical changes during dyke metamorphism in high-grade basement terrains. *Nature*, 289: 47~49.
- Wood D A, Gibson I L, Thompson R N. 1976. Element mobility during zeolite facies metamorphism of the Tertiary basalts of eastern Iceland. *Contrib. Mineral Petrol.*, 55: 241~254.
- Yardley B W D, Boutrell S H. 1992. Stiles mobility and fluid movement during metamorphism of the Connemara schists, Ireland. *J. Metamorphic. Geol.*, 10: 453~464.
- Yu Dagan, Ai Guigen, Huang Guofu et al. 1999. Isotopic age features and their geological implication of the Zhoutan Group in Jiangxi. *Acta Geoscientia Sinica*, 20(2): 195~200 (in Chinese with English abstract).
- Yu Xueyuan, Zheng Zuoping, Niu Hecai. 1996. REE Geochemistry of Baguamiao Gold Deposit. *Geochimica*, 25(2): 140~149 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Y F. 1993. Calculation of oxygen isotope fractionation in anhydrous silicate minerals. *Geochim Cosmochim Acta*, 57: 1 079~1091.
- Zheng Y F. 1993. Calculation of oxygen isotope fractionation in hydroxyl-bearing silicate minerals. *Earth Planet Sci Lett*, 120: 247~263.

Study on Oxygen Isotope and Trace Element Geochemistry of Metamorphic Veins within Zhoutan Group in Central Jiangxi Province

HU Gongren^{1,2,3)}, LIU Congqiang¹⁾, ZHANG Bangtong³⁾, YU Ruilian²⁾

1) Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, 550002

2) Department of Environmental Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou, 362021

3) State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Nanjing University, Nanjing, 210093

Abstract

Trace element and oxygen isotope geochemical studies of the metamorphic veins and their host metasedimentary rocks of the Zhoutan Group at two localities, Xiangshan and Yihuang, in central Jiangxi Province have been conducted in this paper. The results show that the metamorphic quartz veins inherited the REE and oxygen isotope geochemical characteristics from their host rocks, suggesting that the vein-forming fluids were from the host rocks. Additionally, trace element pairs Zr—Hf, Nb—Ta, Y—Ho and U—Th of the veins have to certain degree fractionation being little different from those of their host rocks. This also indicates that the veins are the products of the fluids. The metamorphic veins within the Zhoutan Group metasedimentary rocks were formed principally by lateral diffusion of the metamorphic fluids.

Key words: metamorphic fluid; O isotope; REE mobility; Zhoutan Group; central Jiangxi Province

第38届理事会理事长、副理事长、常务理事、秘书长、副秘书长名单

学会职务	姓名	推荐单位	学会职务	姓名	推荐单位
理事长	孙文盛	国土资源部	姓氏笔画为序(按)	彭士标	中国水电工程顾问集团公司
常务副理事长	孟宪来	中国地质科学院、中国地质调查局		韩豫川	中化地质矿山总局
副理事长(按姓氏笔画为序)	王京彬	有色金属矿产地质调查中心		甄春相	中铁工程设计咨询集团有限公司
	刘玉辰	中国地震局		潘 懋	北京大学地球与空间科学学院
	同学义	中国冶金地质勘查总局	秘书长	朱立新	中国地质科学院
	吴淦国	中国地质大学	专职副秘书长	郝梓国	中国地质学会
	杜金虎	中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司	兼职副秘书长(按姓氏笔画为序)	于孔让	国土资源部办公厅
	邱建刚	中国核工业集团公司		王信虎	武警黄金指挥部
	范蔚茗	中国科学院		邓 军	中国地质大学
	茹 克	中国海洋石油总公司		叶 洪	国家地震局
	徐水师	中国煤田地质总局		张金带	核工业总公司地质局
	蔡希源	中国石油化工集团公司		李 俊	中国建筑材料工业地质勘查中心
常务理事(按姓氏笔画为序)	王瑞生	国土资源部人教司		李建勤	国土资源部宣教中心
	任纪舜	中国地质科学院地质研究所		连 卫	化工地质矿山局
	孙 洪	科技部农村与社会发展司		周少平	中国科学院资环局
	朱立新	中国地质科学院		姚 超	中国石油股份勘探与生产分公司
	邢新田	中国矿业联合会地质勘查协会	骆华宝	中国冶金地质勘查总局	
	张洪涛	中国地质调查局	郭齐军	中国石化股份公司	
	李建伦	中国建筑材料工业地质勘查中心	崔炯成	中国海洋石油总公司	
	李耀刚	建设综合勘察研究设计院	傅水兴	有色金属矿产地质调查中心	
钟自然	国土资源部地勘司	彭齐鸣	中国地质调查局		
柴育成	国家自然科学基金委员会地球科学部	程爱国	中国煤炭地质总局		
阎凤增	中国人民武装警察部队黄金指挥部				