

江苏东海毛发状水晶中金红石矿物学、地球化学特征*

李晓峰¹ 陈振宇¹ 王汝成² 徐珏¹ 王平安¹ 余金杰¹

LI XiaoFeng¹, CHEN ZhenYu¹, WANG RuCheng², Xu Jue¹, WANG PingAn¹ and YU JinJie¹

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

2. 南京大学地球科学系, 南京 210093

1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2005-01-17 收稿, 2005-03-04 改回。

Li XF, Chen ZY, Wang RC, Xu J, Wang PA and Yu JJ. 2005. Mineralogical and geochemical features of hair-like rutile in rocked quartz in Donghai, Jiangsu Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2):475-481

Abstract Donghai is a famous city for the product of rocked quartz in China. The rocked quartz deposit is located Su-Lu ultra-high pressure metamorphic belt, Donghai district. There are occurs as the fissure in eclogite and gneiss, or along the contact zone between the eclogite and gneiss. A lot of solid inclusions such as were discovered in rocked quartz. The back scattered images suggests there are four types rutiles exist in rocked quartz. Type 2 and type 3 spread into type 1 rutiles as angular or lump, and type 3 rutile are also scattered into type 1. There are a number of fractures with type 2 rutile wherever other type with smooth surfaces, the type 3 rutile also occurs as rhythmic banding. No further evidence support the relationship between the type 4 and the other types rutiles. In addition to V and Cr are commensurate with other rutiles, the rutiles in rocked quartz have abnormal high content Fe and Nb (Fe, from 2500×10^{-6} to 26700×10^{-6} , Nb, from 782×10^{-6} to 6000×10^{-6}), expect for high W content in type 3 rutiles. The paper also discusses fundamentally the provenance of rutile in rocked quartz.

Key words Rocked quartz, Rutile, Trace elements, Rhythmic banding

摘要 东海是中国著名的水晶产地, 水晶矿床主要产于苏鲁超高压变质带东海境内中, 发育于榴辉岩、片麻岩张裂隙中及其接触带中。本文利用背散射图象技术和电子探针定量分析相结合的方法, 研究了水晶中的固体包裹体金红石的类型和地球化学特征。结果表明, 水晶中金红石主要有 4 种类型。在背散射图象下, 类型 2 和类型 3 金红石呈棱角状、不规则状镶嵌于类型 1 金红石中以及类型 3 金红石呈不规则状充填于类型 2 中。类型 2 金红石表面有较多的裂隙, 而类型 1、类型 3 和类型 4 金红石表面则比较光滑。还没有发现类型 4 金红石和其它类型金红石之间的明确关系。电子探针分析结果显示, 相对其它金红石来说, 水晶中的金红石 Fe 和 Nb 的含量较高 (Fe 为 2500×10^{-6} - 26700×10^{-6} , Nb 为 782×10^{-6} - 6000×10^{-6}); 而 V 和 Cr 地元素含量则基本相当。在此基础上, 本文进一步探讨了水晶中金红石可能的源区。

关键词 水晶; 金红石; 微量元素; 韵律环带

中图法分类号 P578.47

石英是在自然界中普遍存在的, 绝大多数的岩石中 (如花岗岩、沉积岩和变质岩中) 都含有石英。但是在这些岩石中, 石英颗粒大多是细小的和不规则状的。要形成比较大的而完整的石英晶体则必须有一定的生长条件。纯净的、结晶完好

的、无色透明的 α -石英又称为水晶。天然的水晶中常含有不同类型的包裹体, 如气相包裹体、液相包裹体和固体包裹体, 其中固态包裹体主要为结晶矿物。从形态上可以分为针状、毛发状、纤维状、柱状以及片状、鳞片状、粒状等, 呈针状、纤维

* 本文为国家重点基础研究发展规划项目 (2003CB716507) 资助成果

第一作者简介: 李晓峰, 男, 1971 年生, 博士后, 副研究员, 主要从事矿床地质和地球化学的科研工作, E-mail: lxfdc@sina.com

状的,又称为“发晶”,按其颜色又可分为:红发晶、绿发晶、黄发晶、牛毛晶和黑发晶等;如果针状晶体比较粗,则称为“鬃晶”。东海水晶颜色比较简单,以无色、烟灰色为主,还有少量的紫色、黄色水晶。除具一般水晶的物理、化学特征外,还含有丰富的固体包裹体,这些固态包裹体主要有绿泥石、金红石、直闪石、透闪石以及黑色电气石等(王萍等,2003),它们主要呈针状、毛发状存在。其中含有针状、纤维状金红石包体的水晶,阳光下闪烁着金色的光芒。但到目前为止,东海水晶中金红石矿物标型特征及其微量元素特征还缺乏研究,本文以背散射电子像观察和电子探针成分定量分析为手段,通过对水晶中金红石的矿物标型特征观察和成分定量分析,揭示了水晶中金红石的矿物标型特征及其地球化学特征。

1 地质特征

东海水晶矿床主要分布在苏鲁超高压变质带东海县境内。矿区主要地层为前震旦系沭边组上段上岩带片麻岩、钾长混合岩、角闪片岩及榴辉岩体等。区内北北东向断裂带控制了水晶矿床的空间分布。根据含晶脉的种类、形状、规模及产状,可分含晶石英英脉及含晶云母伟晶岩脉两种。含晶石英英脉和含云母伟晶岩脉均分布于榴辉岩的节理裂隙及与其它岩石之接触带。

含晶脉呈带状分布,走向大部分与围岩一致,倾角较陡。形态一般多为不规则之脉状、串珠状及小岩株状。长度一般在20米左右;沿走向,产状及宽度变化较大,由几米缩小至几十厘米。

含晶脉中的石英以致密结构和块状构造为主,局部见有呈粒状或晶簇状者,一般为灰白、乳白色,临近晶洞部分则变为半透明至透明,淡白、淡黄或无色。脉成分简单,主要由石英组成(SiO_2 含量达95%以上)^①。水晶中还含有一些固体包裹物,主要有绿泥石、绿帘石、镜铁矿、金红石、直闪石、透闪石和黑色电气石等,少数晶体中尚见有幻影和兰针。含晶脉的两侧,围岩蚀变强烈,主要见有以下几种:

蛭石化:蚀变岩呈棕黄、暗红等色,呈疏松泥状充填晶洞中或分布于石英英脉周围及其裂隙中,宽数厘米至数米,一般0.2米。

绿帘石化:绿帘石呈粒状、柱状,包围在含晶脉之外部,成为晶洞外壳,愈近含晶脉,结构愈疏松。

2 分析方法

在东海地区采集含有金红石的水晶样品,磨制成探针光薄片。在光学显微镜下观察后,利用中国地质科学院矿产资源研究所的电子探针(JOEL JXA8800R)重点开展背散射电子像观察和成分定量分析。背散射电子像用于矿物标型特征和矿物内部结构的观察。

水晶中金红石的Ti、Cr、Nb、Fe、V、W、Ta等微量元素的

测试,采用Zack *et al.*(2002)所提供的方法。加速电压20kV,探针电流 1×10^{-7} A,光束直径为5 μm 。Ti、Cr、Nb、Fe、V、W和Ta元素特征峰测量时间分别为100s、200s、200s、150s、150s、100s和240s,相应的检测限分别为 55×10^{-6} 、 33×10^{-6} 、 24×10^{-6} 、 20×10^{-6} 、 62×10^{-6} 、 83×10^{-6} 和 48×10^{-6} 。

3 分析结果

3.1 金红石的矿物标型特征

金红石在水晶中主要呈固体包裹体形式存在,其中以毛发状存在的形式居多。有些金红石近于平行生长,有的则交错生长,有些则呈针状双晶连体。从金红石的背散射电子图像可见,金红石主要以多种形态以固体包裹体形式存在于水晶中,并且颗粒大小也不均匀(图1)。但总的来说,东海水晶中的金红石可以分为4种类型(图1A、B、C、D、E、F)。在背散射图像下,类型1和类型4呈现暗灰色,类型2呈灰白色,而类型3呈现亮白色。类型1、2和3金红石共生,具有明显的先后共生关系,类型4与前3种则没有明显的先后关系。类型3金红石形成最早,类型2其次,类型1最晚(图1A、B、C)。类型1颗粒(图A、B、C)表面较为平滑,没有明显的裂隙;类型2颗粒表面则有明显的两组裂隙发育和溶蚀现象,主要呈团块状、不规则棱角状发育于类型1(图1A、B、C)中。类型3(图1A、B、C)呈棱角状、不规则状,以及纤维状镶嵌或者沿裂隙充填与类型1或者类型2金红石中。类型3(图1E)金红石局部呈现韵律环带。在毛发状金红石的纵截面上(图1F),可以发现金红石是中空的,1、2和3种类型的金红石像树干的年轮一样生长。类型4金红石(图1D)主要呈针状连生体生长,大小不均一,交错丛生,颗粒表面比较光滑、没有溶蚀现象。

3.2 金红石的微量元素特征

电子探针分析结果表明,除了Cr、V外(图2,表1),4种不同类型金红石的微量元素(Fe、Nb、W)含量具有较大的差异。类型1金红石的Ti含量在58.4 wt% ~ 59.5 wt%, Fe含量在 3412.4×10^{-6} ~ 8962.3×10^{-6} , Nb含量在 726.96×10^{-6} ~ 1824.4×10^{-6} , W含量在 0×10^{-6} ~ 650.3×10^{-6} ;类型2金红石的Ti含量在58.3 wt% ~ 59.9 wt%, Fe含量在 3878.7×10^{-6} ~ 10104.9×10^{-6} , Nb含量在 943.7×10^{-6} ~ 6060.33×10^{-6} , W含量在 0×10^{-6} ~ 3068.9×10^{-6} ;类型3金红石的Ti含量在55.7 wt% ~ 58.1 wt%, Fe含量在 10260.4×10^{-6} ~ 26739.1×10^{-6} , Nb含量在 794.6×10^{-6} ~ 5501.1×10^{-6} , W含量在 618.5×10^{-6} ~ 18080.4×10^{-6} ;类型4金红石不同韵律环带之间的成分差异主要表现在Nb、Fe和W的含量上,相对来说,韵律环带亮色部分的Nb、Fe和W的含

① 1:20万新沂幅区域地质报告

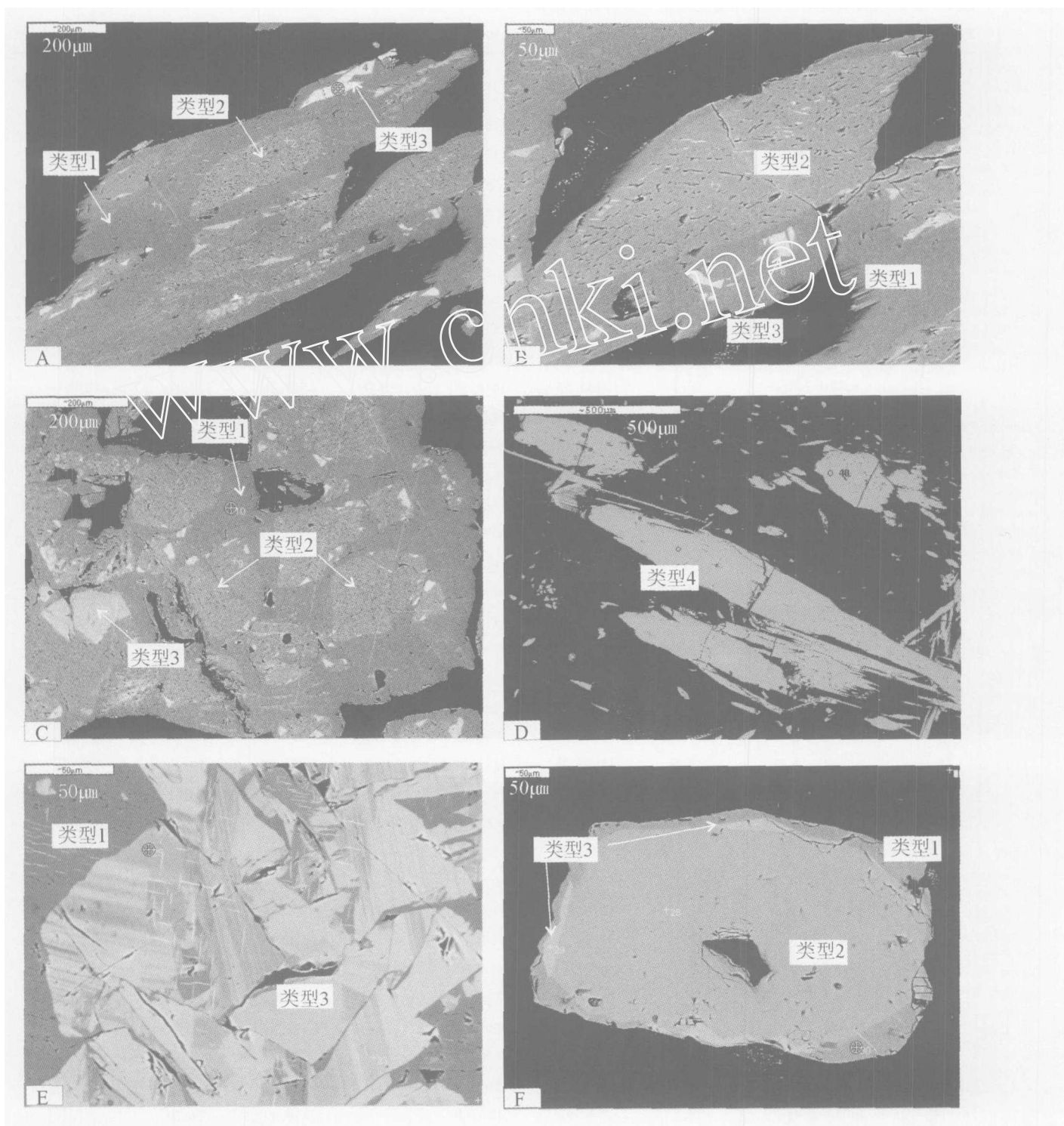


图1 水晶中金红石的背散射图象

Fig. 1 Back scattered images of rutiles in rocked quartz.

量较暗色部分的要高。类型4金红石的Ti含量在59.3 wt% ~ 60.0wt%, Fe含量在 2456.3×10^{-6} ~ 3241.3×10^{-6} , Nb含

量在 2306.7×10^{-6} ~ 4333.8×10^{-6} , 除个别样点外, 基本不含W(表1, 图3、4、5)。

表1 江苏东海水晶中金红石微量元素电子探针分析结果($\times 10^{-6}$)Table Representative electron-microprobe compositions of rutile in rock quartz, Donghai, Jiangsu ($\times 10^{-6}$)

类型	颗粒点	Ti(wt%)	Fe	Nb	Ta	V	Cr	W
1	SJ05-1-01-Rt1	59.3	4741.53	1111.41	—	679.70	225.79	—
	SJ05-1-01-Rt6	58.4	4158.56	1265.19	—	713.69	273.68	55.5
	SJ05-1-2-Rt10	59.2	4174.10	1118.40	—	509.78	205.26	380.6
	SJ05-1-3-Rt15	59.5	3412.35	726.96	—	536.96	444.73	—
	SJ05-1-3-Rt17	59.4	3832.09	1027.53	—	468.99	123.16	309.3
	SJ05-5-1-Rt27	59.5	6451.59	782.88	—	604.93	232.63	166.5
	SJ05-5-2-Rt30	59.3	5759.79	1621.68	141.26	550.56	47.89	325.1
	SJ05-5-2-Rt32	59.3	5821.98	1020.54	—	536.95	95.79	642.3
	SJ05-5-6-Rt35	59.1	8062.27	1824.39	158.92	652.51	68.42	650.3
2	SJ05-1-01-Rt2	58.7	5992.98	6050.32	194.24	761.26	212.10	840.6
	SJ05-1-2-Rt3	59.1	5425.55	3648.78	150.09	543.76	123.16	1015.0
	SJ05-1-3-Rt16	59.9	4010.87	964.62	—	502.98	301.05	190.3
	SJ05-1-3-Rt14	59.1	3878.73	943.65	—	441.81	294.21	—
	SJ05-1-4-Rt21	58.9	4998.04	1677.60	—	530.17	328.42	388.6
	SJ05-5-2-Rt28	58.3	8247.15	2775.03	132.44	441.81	—	3068.9
	SJ05-5-6-Rt34	58.6	10104.90	2090.01	70.63	672.90	116.31	3727.1
3	SJ05-1-01-Rt7	56.3	26739.12	3823.53	79.46	564.15	793.67	618.5
	SJ05-1-01-Rt3	55.7	16867.41	5501.13	282.53	666.11	321.57	13718.9
	SJ05-1-01-Rt4	56.3	16867.41	5473.17	256.04	659.31	376.31	13481.0
	SJ05-1-01-Rt5	56.3	14535.51	5095.71	203.07	638.92	253.15	11102.0
	SJ05-1-2-Rt8	57.8	11970.42	3823.53	—	564.15	143.68	7700.0
	SJ05-1-3-Rt11	56.5	17411.52	5396.28	194.24	468.99	280.52	14987.7
	SJ05-1-3-Rt12	56.7	16401.03	4990.86	79.46	509.78	266.84	12370.8
	SJ05-1-3-Rt13	57.5	13602.75	4382.73	79.46	530.17	177.89	9595.3
	SJ05-1-4-Rt18	56.2	17722.44	3522.96	—	401.02	116.31	16256.5
	SJ05-1-4-Rt19	56.3	17644.71	3543.93	114.78	326.26	123.16	16018.6
	SJ05-1-4-Rt20	57.1	13758.21	3599.85	—	373.84	75.26	10546.9
	SJ05-5-1-Rt26	57.9	13758.21	3851.49	185.41	591.34	177.89	10467.6
	SJ05-5-2-Rt29	58.1	10260.36	2893.86	88.29	509.78	123.16	7438.3
	SJ05-5-2-Rt31	56.9	13369.56	794.62	88.29	570.95	1.48	11339.9
	SJ05-5-6-Rt33	57.1	14302.32	3900.42	—	672.90	164.21	12212.2
	SJ05-1-4-Rt22	56.1	18888.39	3739.65	79.46	414.62	123.16	18080.4
	SJ05-1-4-Rt24	56.2	16401.03	3669.75	—	407.82	102.63	14353.3
4	SJ05-1-4-Rt23	56.4	16867.41	3648.78	88.29	387.43	157.37	14908.4
	SJ05-1-4-Rt25	57.0	13602.75	3362.19	—	380.63	102.63	10467.6
	SJ05-6-1-Rt36	59.7	2930.42	3075.60	—	754.47	424.20	—
	SJ05-6-2-Rt37	59.7	3241.34	2306.70	—	706.89	540.52	—
	SJ05-6-2-Rt38	59.5	3287.98	4333.80	—	570.95	458.41	87.2
	SJ05-7-1-Rt39	60.0	2456.27	2376.60	—	754.47	109.47	—
	SJ05-7-1-Rt40	59.3	2588.41	2935.80	—	584.54	150.52	—
	SJ05-7-2-Rt41	59.5	2922.65	2865.90	—	638.92	143.68	—

其中 Rt22、23、24、25 分别代表具有韵律环带结构的金红石，“—”表示其含量低于检测限。

表 2 不同源区金红石的微量元素特征

Table2 Summary of rutile characteristics from different source rocks

类型	Nb(ppm)	Cr(ppm)	Zr(ppm)	其余元素	备注
变质玄武岩榴辉岩	低(<900)	低(<1000)	低(<500)	低	Zack <i>et al.</i> , 2002
变质辉长岩榴辉岩	可变	高	低	低	Zack <i>et al.</i> , 2002
变质泥岩	高(>900)	低(<1000)	低	低	Plank <i>et al.</i> , 1998
变质基性麻粒岩	可变	可变	高(>500ppm)	低	Fett <i>et al.</i> , 1995
热液石英脉	低	低	低	低	Brenan <i>et al.</i> ,1994
热液矿床	低	低	低	Sn,Sb,W 高	Rice <i>et al.</i> , 1998
金伯利岩	高(>1000)	高(>1000)	未知	未知	Haggerty, 1991
水晶中金红石(1)	730 ~ 1824	46 ~ 445	0	W(0 ~ 650)	本文
水晶中金红石(2)	944 ~ 6060	116 ~ 328	0	W(190 ~ 3727)	本文
水晶中金红石(3)	2393 ~ 5473	75 ~ 793	0 ~ 15	W(619 ~ 18080)	本文
水晶中金红石(4)	2306 ~ 3076	109 ~ 541	0	W(0 ~ 87)	本文

(1)、(2)、(3)和(4)分别代表类型1、2、3和4的金红石。

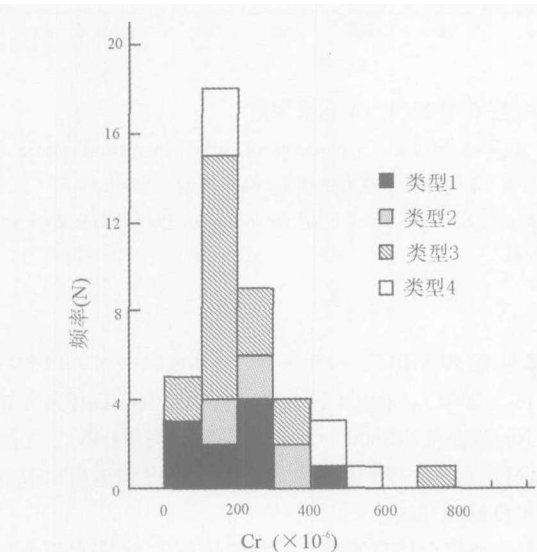


图 2 不同类型金红石 Cr 元素含量直方图
Fig.2 Histograms of Cr content of different rutiles in rocked quartz

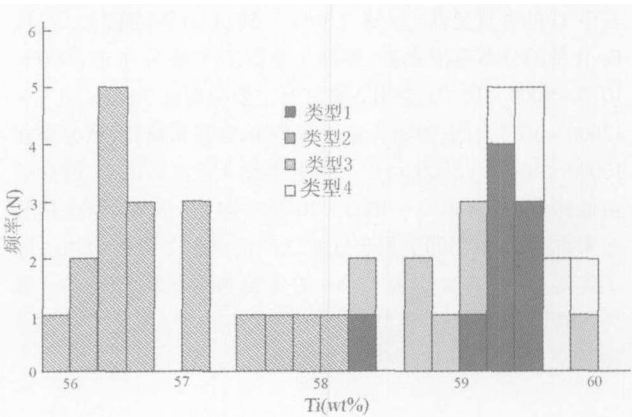


图 3 不同类型金红石 Ti 元素含量直方图
Fig.3 Histograms of Ti content of different rutiles in rocked quartz

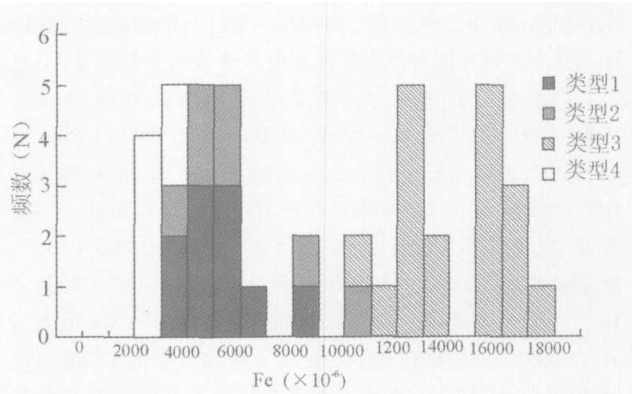


图 4 不同类型金红石 Fe 元素含量直方图
Fig.4 Histograms of Fe content of different rutiles in rocked quartz

4 讨论和结论

4.1 不同类型金红石间微量元素差异

从表 1,图 2、3、4 和 5 可以看出,4 种不同类型的金红石的微量元素含量除了 Cr 和 V 的含量(Cr 和 V 含量主要在 $100 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$ 和 $400 \times 10^{-6} \sim 600 \times 10^{-6}$ 之间)较为一致外,其余具有较大的差异,并且相同元素含量的分布也不一致。除了类型 3 金红石含有较高的 Ta,部分类型 2 金红石含有 Ta 外,其它金红石则不含 Ta。从主要元素的分布来看,不同类型金红石之间 Ti 的含量很不相同,其中,类型 4 金

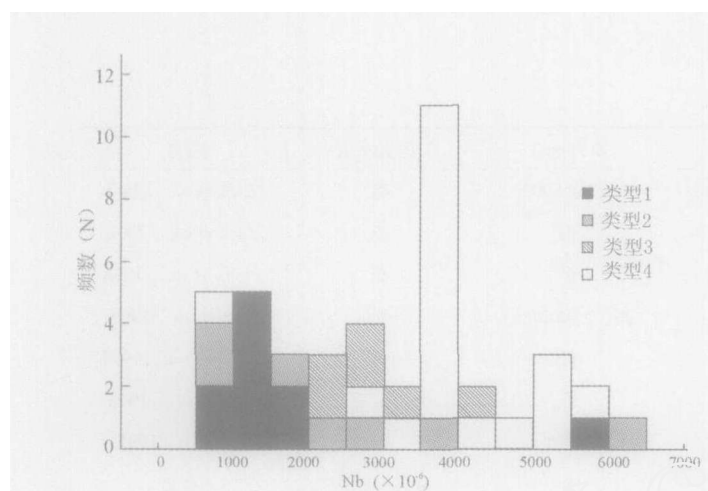


图5 不同类型金红石 Nb 元素含量直方图

Fig. 5 Histograms of Nb content of different rutiles in rocked quartz

红石 Ti 的含量最高, 为 59.3 wt% ~ 60.6 wt%, 而类型 3 金红石中 Ti 的含量最低, 为 55.7 wt% ~ 58.1 wt% (图 3)。从 Fe 含量的分布范围来看, 类型 1 金红石主要分布于 4000×10^{-6} ~ 9000×10^{-6} ; 类型 2 金红石主要分布在 3000×10^{-6} ~ 12000×10^{-6} 之间, 类型 3 金红石 Fe 的含量最高, 大致分布在 10000×10^{-6} ~ 18000×10^{-6} 之间, 类型 4 金红石的 Fe 的含量最低, 为 3000×10^{-6} ~ 4000×10^{-6} (图 4)。从 Nb 的含量分布来看 (图 5), 不同类型金红石之间的含量差异也很大。除了类型 1 和类型 4 金红石 Nb 的含量与变质泥岩基本一致外, 类型 2 和类型 3 金红石则有异常高的 Nb 含量。W 含量在类型 3 金红石中的含量最高。

4.2 金红石可能的源区探讨

金红石是许多高场强元素的载体 (如, V、Cr、Fe、Al、Nb、Sn、Sb、Ta 和 W) (Haggerty, 1991; Smith and Perseil, 1997; Rice *et al.*, 1998), 在许多地质体 (如高级变质岩、岩浆岩、沉积岩和热液矿床) 中都有它的存在。金红石中的微量元素特征及其与其赋存围岩的岩性和类型存在着明显的关系, 引起了人们对金红石的源区示踪产生了极大的兴趣 (Force, 1980, 1991; Noll *et al.*, 1996; McDonough, 1999)。Zack *et al.* (2002, 2004a, b) 利用金红石中的 Nb、Cr、Zr 和 W 等元素作为示踪剂, 探讨了不同源区金红石中微量元素特征。一般来说, 变质成因金红石中 Fe 的含量一般大于 1000×10^{-6} 。变质泥岩源区的金红石的 Nb 的含量在 900×10^{-6} ~ 2700×10^{-6} 之间, Cr 的含量较低 (Plank and Langmuir, 1998; Barth *et al.*, 2000); 变质堆积岩中则具有异常高含量的 Cr, 最多可达 4000×10^{-6} 以上; 来源于变质基性岩源区的金红石则具有低 Cr 和低 Nb 的特点 (Zack *et al.*, 2004b); 来源于金伯利岩金红石则高度富集 Cr 和 Nb (通常情况下 $> 1\text{wt}\%$, Nb_2O_5 和 Cr_2O_3 最高可达 21wt% 和 7wt%) (Haggerty, 1991); 来源于高压变质石英英脉和热液石英英脉中的金红石的 Nb 含量很

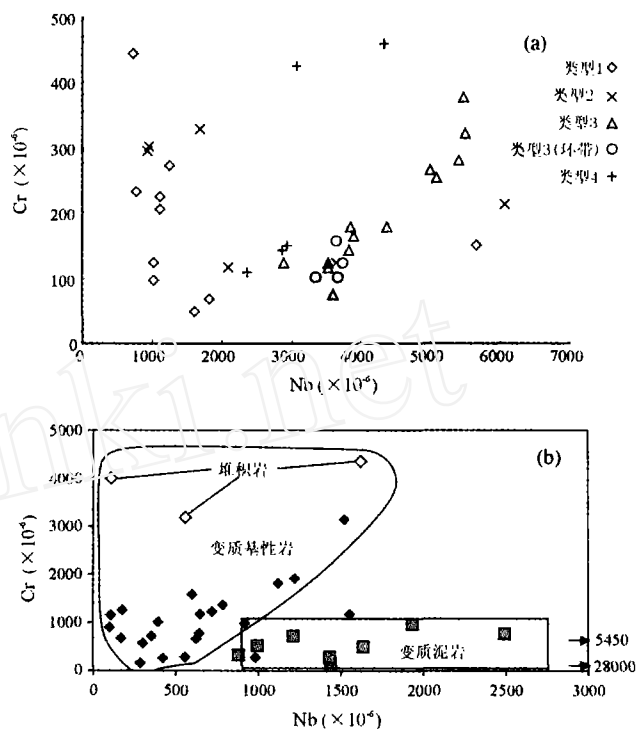


图6 金红石中 Nb 和 Cr 元素图解

Fig. 6 Plot of Nb vs. Cr contents of rutiles in rocked quartz

a, 本文; b, 不同源区金红石的成分 (Zack *et al.*, 2004b)

a, this paper; b, Source-rock areas for rutiles are quoted from Zack *et al.* (2004b)

低, 通常只有 50×10^{-6} ~ 150×10^{-6} (Brenan *et al.*, 1994; Zack *et al.*, 2002); 来源于长英质麻粒岩中金红石却含有异常高的 Nb, 最高可达 28000×10^{-6} (Zack *et al.*, 2004b)。上述成果的取得, 为进一步利用金红石示踪其源区和地质构造背景提供了良好的开端。

与已知源区金红石的微量元素特征相比, 东海水晶中金红石的微量元素有独特之处。金红石中 Fe 和 Nb 的含量大大高于其它源区金红石的含量。在 Nb-Cr 系统中 (图 6a) 中, 类型 1、2 金红石除个别点的含量外, 大多数类型 1、2 和 4 的 Nb 的含量位于 Zack *et al.* (2004b) 所定义的变质泥岩 Nb 含量范围 (900×10^{-6} ~ 2700×10^{-6}) (图 6b); 而除一个点外, 类型 3 金红石的 Nb 的含量 (2800×10^{-6} ~ 5500×10^{-6}) 都在这个范围之外, 比较接近于麻粒岩相中金红石 Nb 的含量。Zack *et al.* (2004b) 认为金红石中异常高的 Nb 含量主要来自于长英质麻粒岩, 而非麻粒岩相的玄武岩, 是由于长英质麻粒岩中高 Ti 的黑云母的存在所致。在高温的条件下, 黑云母是长英质岩和变质泥岩全岩 Ti 的载体。相对于 Nb 来说, Ti 更容易进入黑云母 (LaTourrette *et al.*, 1995)。这样就使黑云母中含有较多的 Ti, 而较多的 Nb 则进入金红石中。

在图 7 中, 不同类型金红石的 Ti 和 Nb 存在明显的负相关关系, 尤其是类型 3 金红石的 Ti 和 Nb 存在负相关关系,

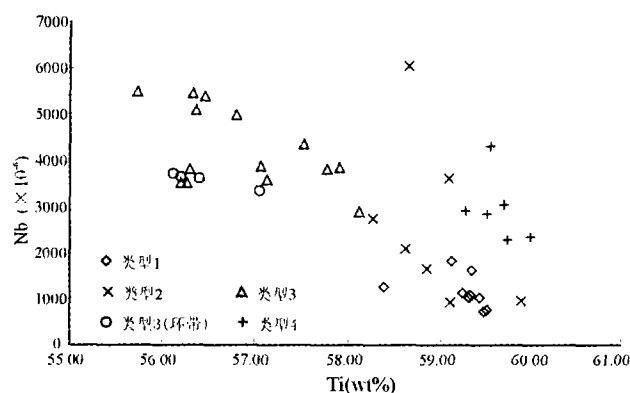


图7 金红石中 Ti 和 Nb 的相关性

Fig. 7 Plot of Ti vs. Nb contents of rutile in rocked quartz

说明了在分馏过程中, Nb 和 Ti 的分离, 这可能是在热液作用过程中的蛭石化蚀变作用有关。在含晶石英脉的脉壁发育大量的蛭石和大片状的黑云母可以说明这一点。

综上所述, 类型 1、2 和 4 金红石可能来源于变质的泥质岩, 类型 3 金红石与长英质岩石有关。

致谢 在野外工作过程中, 得到了项目首席科学家许志琴院士、刘福来研究员、张泽明研究员以及蔡慈副研究员、孙立文工程师、黄尧工程师等人的指导和帮助。王立本研究员审阅了全文, 并提出了宝贵的意见, 在此对他们表示诚挚的谢意

References

- Barth M G, McDonough W F, Rudnick R L. 2000. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust. *Chemical Geology*, 165, 197–213
- Brenan J M, Shaw H F, Phinney D L, Ryerson F J. 1994. Rutile-aqueous fluid partitioning of Nb, Ta, Hf, Zr, U and Th: implications for high field strength element depletions in island-arc basalts. *Earth Planetary Science Letters*, 128, 327–339
- Fett A. 1995. Elementverteilung phase-equilibrium study of Al- and Ti-contents of calcic amphibole in MORB-A semiquantitative thermobarometer. *American Mineralogist*, 83, 952–969
- Force E R. 1980. The provenance of rutile. *J. Sediment. Petrology*, 50, 485–488
- Force E R. 1991. Geology of titanium-mineral deposits. *Geological Society of America Special Paper*, 259, Boulder, 112p
- Haggerty S E. 1991. Oxide mineralogy of the upper mantle. In: Lindsley, D H. (ed.), *Oxide minerals: Petrological and Magnetic Significance*. *Reviews in Mineralogy*, 25, 355–416
- LaTourrette T, Hervig R L, Holloway J R. 1995. Trace element partitioning between amphibole, phlogopite, and basaltic melt. *Earth Planetary Science Letters*, 135, 13–30
- McDonough W F. 1999. How well do we know the siderophile element signature of the silicate earth? *EOS*, 80(17), S364
- Noll P D, Newsom H E, Leeman, W P, Ryan J G. 1996. The role of hydrothermal fluids in the production of subduction zone magmas: evidence from siderophile and chalcophile trace elements and boron. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60, 587–611
- Plank T, Langmuir C H. 1998. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. *Chemical Geology*, 124, 325–394
- Rice C M, Darke K E, Still J W. 1998. Tungsten-bearing rutile from the Kori Kollo gold mine Bolivia. *Mineral Magazine*, 62, 421–429
- Smith D C, Perseil E A. 1997. Sb-rich rutile in the manganese concentrations at St. Marcel-Praborna, Aosta Valley Italy: petrology and crystal-chemistry. *Mineral Magazine*, 61, 655–669
- Wang Ping, Li Guochang, Sun Fengyun, Zhang Xiuying. 2003. Study on Solid Inclusions in natural quartz crystals. *Jewelry Science and Technology*, 15(5), 39–43
- Zack T, Kronz A, Foley S, Rivers T. 2002. Trace element abundance in rutiles from eclogites and associated garnet mica schists. *Chemical Geology*, 184, 97–122
- Zack T, Moraes R, Kronz. 2004a. Temperature dependence of Zr in rutile: empirical calibration of a rutile thermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 148, 471–488
- Zack T, von Eynatten H, Kronz A. 2004b. Rutile geochemistry and its potential use in quantitative provenance studies. *Sedimentary Geology*, 171, 37–58

附中文参考文献

- 王萍, 李国昌, 孙丰云, 张秀英. 2003. 天然水晶中常见的固态包裹体研究. *珠宝科技*, 15(5), 39–43