

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

中国大陆科学钻探工程主孔榴辉岩中金红石 微量元素地球化学特征

余金杰¹⁾, 徐珏¹⁾, 陈振宇¹⁾, 王登红¹⁾, 陈毓川²⁾, 王平安³⁾, 李晓峰¹⁾

1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京, 100037; 2) 中国地质科学院, 北京, 100037;

3) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081

内容提要: 本文利用电子探针分析了中国大陆科学钻探工程主孔各种类型榴辉岩中金红石的 Nb、Cr 和 Zr 含量。Zack 等(2002)的金红石 Nb-Cr 图解表明榴辉岩的原岩均为镁铁质岩, 但不同类型榴辉岩具有不同的地球化学特征, 即: ①金红石榴辉岩、石英榴辉岩、角闪岩和钛铁榴辉岩中金红石的 Nb 和 Cr 含量大致相同, 主孔中上述榴辉岩中金红石的 Nb、Cr 含量与区域上小焦金红石矿区金红石榴辉岩中金红石的 Nb、Cr 含量基本相同。总体来讲, 区域和主孔榴辉岩中金红石以低 Nb 为特征, 反映它们的原岩为镁铁质岩石。②蓝晶石多硅白云母榴辉岩中金红石具最高的 Nb 和 Cr 含量, 其 Nb 和 Cr 均值分别为 720×10^{-6} 和 712×10^{-6} , 多硅白云母榴辉岩中金红石比金红石榴辉岩、石英榴辉岩、角闪岩和钛铁榴辉岩中金红石富集 Cr。利用 Zack 等(2004)提出的金红石地质温度计, 计算出金红石榴辉岩的金红石形成温度介于 $608 \sim 746^\circ\text{C}$, 石英榴辉岩的金红石温度介于 $629 \sim 680^\circ\text{C}$, 钛铁榴辉岩金红石的形成温度介于 $629 \sim 704^\circ\text{C}$, 蓝晶石多硅白云母榴辉岩的金红石形成温度为 600°C , 角闪岩的金红石形成温度为 629°C 。一种可能的解释是, 榴辉岩在折返过程中退变质作用明显, 流体活动强烈, 导致金红石中 Zr 扩散丢失, 金红石中 Zr 含量不同程度地受到角闪岩相退变质过程中再平衡作用的影响, 致使计算的温度偏低。

关键词: 金红石; 微量元素; 榴辉岩; 原岩; 再平衡; 主孔; 大陆科学钻探工程

金红石是榴辉岩中常见副矿物, 当榴辉岩中金红石含量较高时, 形成特征性榴辉岩型金红石矿床, 苏北地区有两个这样的大型金红石矿床, 即小焦金红石矿床和蒋马一毛北金红石矿, 榴辉岩型金红石矿今后将成为主要的钛资源 (Force, 1991)。中国大陆科学钻探工程主孔位于江苏省东海县蒋马一毛北金红石矿区, 揭示了苏鲁超高压变质地体中的不同类型榴辉岩 (许志琴, 2004), 这些榴辉岩中不同程度出现金红石或其他钛矿物的富集作用。徐珏等 (2004) 报道了主孔超高压变质岩中的钛矿化。王汝成等 (2005) 探讨了主孔榴辉岩中金红石微量元素地球化学特征及成矿意义。金红石是俯冲带中高场强元素 Nb、Ta 的重要载体矿物 (Rudnick et al., 2000; Zack et al., 2002), 因而该矿物受到岩石地球化学家的高度重视 (王汝成等, 2005)。本文利用金红石中 Nb、Cr 含量来判别榴辉岩的原岩, 利用金红石 Zr 地质温度计 (Zack et al., 2004) 计算金红石的形成温度, 并探讨了退变质作用期间金红石中的锆的

再平衡。上述研究对揭示金红石成矿物质来源、形成温度以及退变质作用对金红石矿的改造作用具有重要意义。

1 主孔岩性和矿化剖面

许志琴 (2004)、张泽明等 (2004)、刘福来等 (2004, 2005) 和徐珏等 (2004) 详细描述了主孔岩心的岩石学和矿化特征。岩心主要由榴辉岩、斜长角闪岩、副片麻岩、正片麻岩、石榴橄榄岩和少量片岩和石英岩组成。榴辉岩的矿物组成主要是石榴子石和绿辉石, 含少量石英 (或柯石英)、蓝晶石、多硅白云母、黝帘石、金红石、钛铁矿和锆石。根据榴辉岩次要矿物含量可分为石英榴辉岩、金红石榴辉岩、钛铁榴辉岩、多硅白云母榴辉岩和普通榴辉岩。其中, 金红石榴辉岩根据次要矿物含量可分为多硅白云母金红石榴辉岩和石英金红石榴辉岩, 钛铁榴辉岩可分为金红石钛铁榴辉岩和多硅白云母钛铁榴辉岩。钻孔中榴辉岩常常经历不同程度角闪岩相退变

注: 本文为国家重点基础研究发展规划“973”项目 (编号 2003CB716507) 资助成果。

收稿日期: 2006-04-18; 改回日期: 2006-06-30; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 余金杰, 男, 博士, 研究员。现从事矿产资源调查与评价工作。通讯地址: 100037, 北京市百万庄路26号, 中国地质科学院矿产资源研究所; 电话: 010-68999044; Email: yjjchina@sina.com。

质作用改造,致使部分地段榴辉岩变成石榴角闪岩、绿帘斜长角闪岩等。

主孔100~2000m见四层矿化层(徐珏等,2004),累计矿化视厚度1017m,岩性主要由金红石榴辉岩和钛铁榴辉岩组成。矿化层榴辉岩中钛矿物包括金红石、钛铁矿、含钛磁铁矿和榍石,据本次总共290个点电子探针分析结果,金红石TiO₂含量变化于95.73%~100.18%,平均值98.65%,金红石纯度较高。由于后期角闪岩相退变质作用改造,金红石退变为榍石和钛铁矿,其电子探针分析结果见表1,榍石和部分钛铁矿是榴辉岩发生退变质作用后形成的标志性矿物。

2 样品位置、金红石赋存状态和方法

主孔中样品位置见表3。在苏北超高压变质带,

金红石在各种榴辉岩中的存在形式有四种:①以细小的颗粒(包体)分布于石榴子石和绿辉石中;②以大小不等的颗粒分布在石榴子石和绿辉石矿物粒间,这种形式的金红石数量最多,也最为重要;③退变质阶段形成的蚀变残余形式,在后成合晶中所形成的金红石往往呈蚀变残留状,金红石边缘常常有钛铁矿和榍石退变边;④热液充填式金红石,呈脉状、串珠状或巨晶状充填在矿石原生节理、裂隙中,金红石自形程度较高,大多为后期热液作用所形成。主孔钻孔中金红石以第②种形式为主,第①种和第③种形式也较为常见。

金红石中Cr、Nb和Zr微量元素测试采用Zack等(2002)所提供的方法。加速电压20kV,探针电流1×10⁻⁷A,光束直径为5μm。Cr、Nb、Zr分光晶体分别为LIF、PETH、PETH,Cr、Nb、Zr计数时间(峰)

表1 钛铁矿和榍石电子探针分析结果(%)

Table 1 Electron microprobe analyses of ilmenite and sphene (%)

分析编号	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	FeO	V ₂ O ₃	CaO	MnO	总量	矿物名称
Yujj2-4-8	—	1.358	0.016	0.052	50.72	50.36	0.208	—	—	102.714	钛铁矿
Yujj8-2-2	0.019	0.01	0.61	30.17	38.19	0.403	0.135	27.71	—	97.247	榍石
Yujj12-1-Ilm1	0.007	0.652	0.022	0.035	50.15	47.619	0.063	0.01	—	98.558	钛铁矿
Yujj12-1-Ilm2	0.024	0.297	0.016	0.043	48.07	50.607	0.072	0.01	—	99.139	钛铁矿
Yujj12-1-Ilm3	0.073	0.273	0.038	0.101	40.19	57.694	0.078	0.077	—	98.524	钛铁矿
Yujj12-2-Ilm1	—	0.563	0.018	0.016	49.31	48.657	0.076	0.01	—	98.650	钛铁矿
Yujj12-2-Ilm2	—	0.53	0.017	0.025	50.15	48.143	0.077	0.011	—	98.953	钛铁矿
Yujj12-2-Ilm5	0.031	0.56	0.013	0.012	50.54	47.839	0.078	0.01	—	99.083	钛铁矿
Yujj12-2-Ilm8	0.013	0.686	0.014	0.022	50.6	47.534	0.073	0.013	—	98.955	钛铁矿
Yujj12-2-Ilm9	0.01	0.731	0.01	0.024	50.86	47.461	0.082	0.009	—	99.187	钛铁矿
Yujj12-2-Sph11	0.028	0.019	0.697	29.36	37.86	0.578	0.067	27.48	—	96.089	榍石
Yujj14-1-Sph5	—	—	0.654	29.52	37.72	0.589	0.092	27.58	—	96.155	榍石
Yujj14-1-Ilm6	—	0.343	0.011	0.028	47.62	50.86	0.092	0.018	—	98.972	钛铁矿
Yujj14-2-Ilm1	0.009	0.315	0.042	0.142	47.54	50.89	0.093	0.052	—	99.083	钛铁矿
Yujj14-2-Sph2	—	—	0.788	29.77	38.11	0.725	0.081	27.92	—	97.394	榍石
Yujj14-2-Sph3	—	—	0.858	29.58	37.59	0.708	0.076	27.66	—	96.472	榍石
Yujj14-2-Ilm5	0.016	0.41	0.115	0.361	46.1	51.89	0.079	0.031	—	99.002	钛铁矿
Yujj14-3-Ilm1	0.032	0.373	0.019	0.062	48.57	49.69	0.092	0.013	—	98.851	钛铁矿
Yujj14-3-Sph2	0.02	—	0.654	29.43	38.18	0.55	0.095	27.79	—	96.719	榍石
Yujj15-1-Ilm4	0.049	0.69	0.045	0.207	50.81	47.05	0.081	0.018	—	98.950	钛铁矿
Yujj18-2-Ilm2	0.018	0.738	0.01	0.015	52.53	46.54	0.07	—	—	99.921	钛铁矿
Yujj18-2-Ilm4	0.024	0.744	0.024	0.057	51.12	46.55	0.077	0.012	—	98.608	钛铁矿
Yujj18-3-Ilm2	0.021	0.968	0.02	0.068	51.47	45.44	0.068	0.014	—	98.069	钛铁矿
Yujj18-3-Ilm4	0.02	0.946	0.032	0.085	51.93	45.94	0.071	0.01	—	99.034	钛铁矿
Yujj18-3-Ilm5	0.013	0.854	0.017	0.018	51.12	46.34	0.068	—	—	98.430	钛铁矿
Yujj18-3-Ilm6	0.007	0.901	0.012	0.047	51.58	41.31	0.062	0.017	3.46	97.396	钛铁矿
Yujj18-4-Ilm2	0.038	1.071	0.017	0.034	51.28	45.22	0.061	0.01	2.98	100.711	钛铁矿
Yujj18-4-Ilm4	0.019	0.848	0.014	0.019	51.02	44.68	0.068	—	0.89	97.558	钛铁矿
Yujj18-4-Ilm7	0.028	0.906	0.01	0.025	51.36	44.94	0.068	0.011	2.97	100.318	钛铁矿
Yujj18-4-Ilm9	0.009	0.871	0.014	0.029	53.39	41.37	0.036	0.01	3.34	99.069	钛铁矿
Yujj18-4-Ilm11	0.049	0.712	0.151	0.389	53.03	43.37	0.039	0.017	0.979	98.736	钛铁矿
Yujj18-5-Ilm2	—	0.833	0.014	0.032	53.17	41.91	0.035	0.016	3.19	99.200	钛铁矿
Yujj18-5-Ilm4	0.007	0.709	0.016	0.038	53.78	43.69	0.027	0.016	0.72	99.003	钛铁矿

分别为150s、240s和300s,Cr、Nb、Zr计数时间(背景)分别为75s、120s和150s,Cr、Nb和Zr微量元素测试的标样分别为 Cr_2O_3 、 KNbO_3 、 ZrSiO_4 。Zr、Nb和Cr电子探针分析检测的极限值分别是 19×10^{-6} 、 21×10^{-6} 和 36×10^{-6} ,电子探针对上述元素分析精度约10%。为了检验分析的精度和误差,选择同批分析的一个薄片(许沟超基性岩中榴辉岩,不是本文分析样品)进行单点重复性分析(总共分析4次),该点4次分析 TiO_2 含量变化于98.22%~98.91%,Cr含量变化于 1683×10^{-6} ~ 1758×10^{-6} ,Nb含量变化于 336×10^{-6} ~ 391×10^{-6} ,Zr含量变化于 281×10^{-6} ~ 318×10^{-6} ,分析结果完全在误差范围内,因而分析结果比较准确可靠。

3 分析结果

本次研究分析了主孔各种榴辉岩中金红石微量元素 Nb、Cr 和 Zr 含量,总计 290 个点,其中 B275R228P1aL 和 B298R244P1c 二个样品未分析 Nb 含量,B526R388P1e 样品有一个点未分析 Nb,B208R185P1c 样品有 8 个点、B298R244P1c 样品有 1

个点、B187R167P1h 样品有 2 个点、B243R208P1v 样品有 3 个点、B183R162P2 样品有 4 个点未分析 Cr,B526R388P1e 样品有 1 个点未分析 Zr。经统计和计算后,不同类型榴辉岩 Nb、Cr 和 Zr 含量见表 2,每个样品 Nb、Cr 和 Zr 微量元素分析结果及计算的形成温度列入表 3。金石榴辉岩 Nb 含量变化于 63×10^{-6} ~ 832×10^{-6} ,平均值 251×10^{-6} ,Cr 含量变化于 55×10^{-6} ~ 814×10^{-6} ,平均值 276×10^{-6} ;石英榴辉岩 Nb 含量变化于 168×10^{-6} ~ 790×10^{-6} ,平均值 420×10^{-6} ,Cr 含量变化于 48×10^{-6} ~ 438×10^{-6} ,平均值 166×10^{-6} ;角闪岩 Nb 含量变化于 119×10^{-6} ~ 357×10^{-6} ,平均值 221×10^{-6} ,Cr 含量变化于 109×10^{-6} ~ 636×10^{-6} ,平均值 299×10^{-6} ;钛铁矿榴辉岩 Nb 含量变化于 210×10^{-6} ~ 538×10^{-6} ,平均值 262×10^{-6} ,Cr 含量变化于 48×10^{-6} ~ 472×10^{-6} ,平均值 294×10^{-6} ;蓝晶石多硅白云母榴辉岩 Nb 含量变化于 336×10^{-6} ~ 1125×10^{-6} ,平均值 720×10^{-6} ,Cr 含量变化于 369×10^{-6} ~ 1033×10^{-6} ,平均值 712×10^{-6} (表 2)。

表 2 大陆科学钻探主孔榴辉岩中金红石的 Nb、Cr 和 Zr 含量($\times 10^{-6}$)
Table 2 Nb, Cr and Zr contents ($\times 10^{-6}$) of rutiles in eclogite from the main drill hole of Chinese Continental Scientific Drilling Project

岩性	Nb			Cr			Zr		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
金石榴辉岩	832	63	251	814	55	276	370	67	144
石英榴辉岩	790	168	420	438	48	166	222	67	123
角闪岩	357	119	221	636	109	299	148	67	110
钛铁矿榴辉岩	538	210	262	472	48	294	267	74	123
蓝晶石多硅白云母榴辉岩	1125	336	720	1033	369	712	118	74	98

4 榴辉岩原岩岩性

榴辉岩中金红石包含的微量元素有 Fe、Cr、Nb、Zr 等。Nb 是重要的高场强元素,Zack 等(2002)研究表明,榴辉岩中几乎 100% 的 Nb 集中于金红石中。榴辉岩中 Cr 的载体矿物是绿辉石、石榴子石和金红石,尽管榴辉岩中 Cr 只有小部分贮存于金红石中,但金红石的 Cr 含量与全岩 Cr/ TiO_2 值之间存在较好的一致性,说明金红石中 Cr 含量变化与全岩相同(Zack et al., 2002)。上述认识表明金红石中 Nb、Cr 含量可以反映全岩中这二个元素的特征,因此金红石中 Cr、Nb 和 Zr 含量能指示榴辉岩的成因。Zack 等(2002)研究表明,Cr 和 Nb 含量可以用来区

别榴辉岩的原岩是镁铁质岩石还是长英质变泥质岩(图 1)。从图 1 可以看出,主孔榴辉岩数据点整体落在原岩为镁铁质岩石的榴辉岩区域内或其附近,多硅白云母榴辉岩中金红石个别点落入变泥质岩区,是什么原因造成的目前仍不清楚。不同的榴辉岩具有各自不同的 Nb 和 Cr 含量,即:①金石榴辉岩、石英榴辉岩、角闪岩和钛铁矿榴辉岩中金红石的 Nb 和 Cr 含量大致相同,主孔中上述榴辉岩中金红石的 Nb、Cr 含量与区域上小焦金红石矿区金石榴辉岩中金红石的 Nb、Cr 含量基本相同,但小焦金红石榴辉岩中金红石 Nb 含量略低。总体来讲,区域和主孔榴辉岩中金红石以低 Nb 为特征,反映它们的原岩为镁铁质岩石。②蓝晶石多硅白云母榴辉岩中金

表 3 大陆科学钻探主孔榴辉岩中金红石的 Nb、Cr、Zr 含量($\times 10^{-6}$)及计算温度Table 3 Nb, Cr and Zr contents ($\times 10^{-6}$) of rutiles in eclogites and calculated temperature (°C) from the main drill hole of Chinese Continental Scientific Drilling Project

样品号	采样位置 (m)	岩性	Nb			Cr			Zr			t_1	t_2
			最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值		
B36R32P4f	164.1	金石榴辉岩	224	84	156	438	239	349	126	67	93	586	608
B56R54P2bA	200.0	石英金石榴辉岩	252	126	189	192	68	197	155	67	114	613	635
B80R76P1b	236.88	石英榴辉岩	301	168	209	192	55	100	148	96	115	614	629
B87R82P2a	248.2	退变石英金石榴辉岩	776	329	412	458	62	142	207	89	134	635	672
B136R118P3e	327.1	退变多硅白云母金石榴辉岩	217	189	210	342	137	226	141	81	111	609	622
B183R162P2	407.7	石英榴辉岩	790	350	634	151	48	74	222	74	140	641	680
B187R167P1h	413.60	弱退变金石榴辉岩	832	657	754	137	55	87	148	89	116	615	629
B208R185P1c	448.85	新鲜金石榴辉岩	154	77	120	151	55	85	229	67	114	613	684
B243R208P1v	501.7	中等退变金石榴钛铁矿榴辉岩	538	252	297	164	48	83	267	104	151	651	704
B275R228P1aL	553.33	新鲜金石榴辉岩				452	68	142	370	215	294	741	746
B298R244P1c	591.90	新鲜金石榴辉岩				1362	62	265	126	59	97	591	608
B368R291P1j	709.9	蓝晶石多硅白云母榴辉岩	1125	336	720	1033	369	712	118	74	98	593	600
B384R302P1bL	732.7	退变多硅白云母金石榴辉岩	112	63	93	814	458	578	155	89	109	607	635
B526R388P1e	960.35	斜长角闪岩	203	119	152	198	109	163	148	81	115	614	629
B598R428P1f	1082.53	石英榴辉岩	440	308	377	438	219	318	155	67	112	611	635
B975R632P5a	1870.8	多硅白云母钛铁矿榴辉岩	287	210	244	472	233	378	148	67	110	608	629
B1003R638P57d	1916.70	绿帘角闪岩	357	203	252	636	260	373	148	67	107	604	629
B1047R648P4e	1987.90	弱-中等退变金石榴辉岩	343	161	200	794	424	642	133	81	107	604	615

注: t_1 (°C) = $134.7 \times \ln(\text{Zr 平均}) - 25$; t_2 (°C) = $127.8 \times \ln(\text{Zr 最高}) - 10$ 。

红石具最高的 Nb 和 Cr 含量,其 Nb 和 Cr 均值各自为 720×10^{-6} 和 712×10^{-6} ,多硅白云母榴辉岩中金红石比金石榴辉岩、石英榴辉岩、角闪岩和钛铁矿榴辉岩中金红石富集 Cr,据王汝成等(2005)和余金杰等(2006)资料,多硅白云母榴辉岩中金红石比区域和主孔蓝晶石榴辉岩中金红石贫 Cr,后者以显著富 Cr 为特点。

5 Zr 含量及金红石中 Zr 的再平衡

在变质条件下,金红石中 Zr 含量受到共生矿物石英和锆石缓冲,并显著受到温度的控制,而不受压力影响(Zack et al., 2004)。根据以上原理,Zack 等(2004)提出了金红石地质温度计,他们通过对不同程度变质岩中金红石-石英-锆石的组合分析(变质温度范围 430~1100°C),经验校正了温度对金红石中 Zr 含量的影响,获得如下金红石锆地质温度计:

$$t(^{\circ}\text{C}) = 134.7 \times \ln(\text{Zr}) - 25 \quad (1)$$

为了减少退变质作用对金红石成分的影响,Zack 等(2004)还提出了适用于石榴子石或绿辉石中金红石包裹体的最高 Zr 含量的温度计计算公式:

$$t(^{\circ}\text{C}) = 127.8 \times \ln(\text{Zr}) - 10 \quad (2)$$

在本次研究中,我们对主孔不同类型榴辉岩中金红石的 Zr 含量进行了分析,分析结果见表 2、4。在总共 289 个数据点中,金石榴榴辉岩的金红石 Zr 含

量变化于 $67 \times 10^{-6} \sim 370 \times 10^{-6}$,均值 144×10^{-6} ;石英榴辉岩的金红石 Zr 含量变化于 $67 \times 10^{-6} \sim 222 \times 10^{-6}$,均值 123×10^{-6} ;角闪岩的金红石 Zr 含量变化于 $67 \times 10^{-6} \sim 148 \times 10^{-6}$,均值 110×10^{-6} ;钛铁矿榴辉岩的金红石 Zr 含量变化于 $74 \times 10^{-6} \sim 267 \times 10^{-6}$,均值 123×10^{-6} ;多硅白云母榴辉岩的金红石 Zr 含量变化于 $74 \times 10^{-6} \sim 118 \times 10^{-6}$,均值 98×10^{-6} (表 2)。如果按照单个样品来统计,金石榴榴辉岩 Zr 含量平均值介于 $93 \times 10^{-6} \sim 294 \times 10^{-6}$,采用公式(1)计算出金红石的形成温度介于 586~741°C(图 2a),Zr 含量最高值变化于 $126 \times 10^{-6} \sim 370 \times 10^{-6}$,采用公式(2)计算出金红石的形成温度介于 608~746°C(图 2b);石英榴辉岩 Zr 含量平均值介于 $112 \times 10^{-6} \sim 140 \times 10^{-6}$,采用公式(1)计算出金红石的形成温度介于 611~641°C(图 2a),Zr 含量最高值变化于 $148 \times 10^{-6} \sim 222 \times 10^{-6}$,采用公式(2)计算出金红石的形成温度介于 629~680°C(图 2b);角闪岩 Zr 含量平均值介于 $107 \times 10^{-6} \sim 115 \times 10^{-6}$,采用公式(1)计算出金红石的形成温度介于 604~614°C(图 2a),Zr 含量最高值为 148×10^{-6} ,采用公式(2)计算出金红石的形成温度为 629°C(图 2b);钛铁矿榴辉岩 Zr 含量平均值介于 $110 \times 10^{-6} \sim 151 \times 10^{-6}$,采用公式(1)计算出金红石的形成温度介于 608~651°C(图 2a),Zr 含量最高值变化于 $148 \times 10^{-6} \sim 267 \times 10^{-6}$,

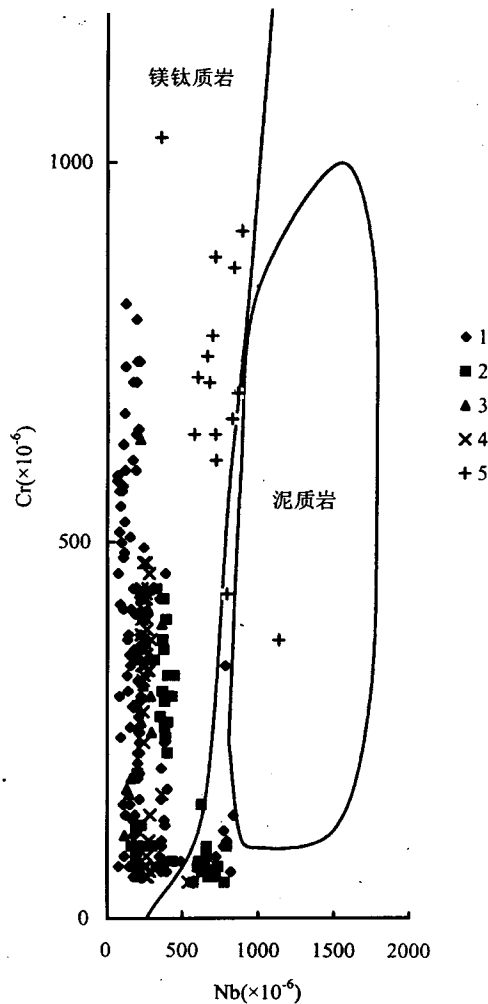


图 1 榴辉岩中金红石的 Nb-Cr 图解

(金红石成分的原岩分区引自 Zack et al., 2002)

Fig. 1 Nb-Cr diagram of rutile in eclogite (source rock areas for rutile are quoted from Zack et al., 2002)

1—金红石榴辉岩; 2—石英榴辉岩; 3—角闪岩; 4—钛铁矿榴辉岩; 5—多硅白云母榴辉岩

1—Rutile eclogite; 2—quartz eclogite; 3—hornblende; 4—ilmenite eclogite; 5—phengite eclogite

采用公式(2)计算出金红石的形成温度介于629~704℃(图2b);多硅白云母榴辉岩 Zr 含量平均值 98×10^{-6} ,采用公式(1)计算出金红石的形成温度为593℃(图2a),Zr 含量最高值为 118×10^{-6} ,采用公式(2)计算出金红石的形成温度为600℃(表3和图2b)。

苏北超高压变质带变质作用的 P - T - t 轨迹一直是最近研究的主题。目前大家普遍认为苏北地区超高压变质带经历了绿帘-角闪岩相进变质、超高压峰期变质以及角闪岩相和绿片岩相退变质演化历史

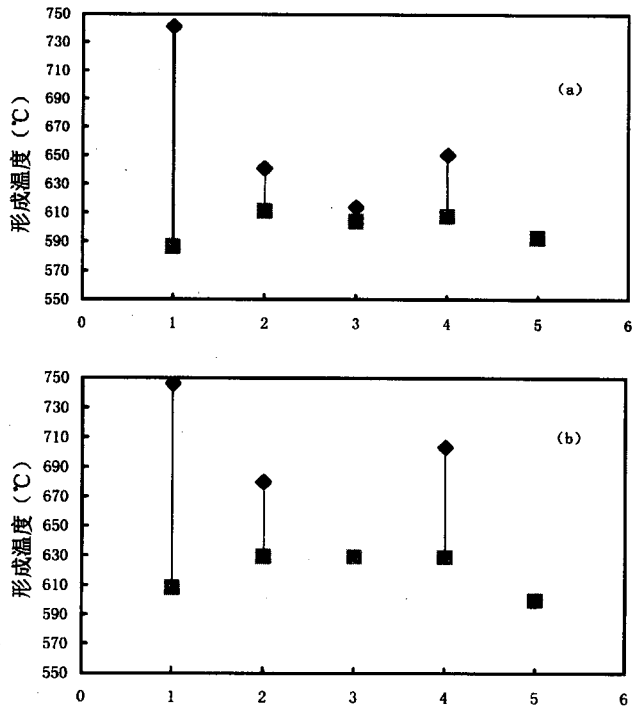


图 2 主孔榴辉岩的形成温度

Fig. 2 Formation temperature (°C) of eclogites in the main hole of the Chinese Continental Scientific Drilling Project

(a)—根据公式(1)计算出的榴辉岩形成温度;(b)—根据公式(2)计算出的榴辉岩形成温度;1—金红石榴辉岩;2—石英榴辉岩;3—角闪岩;4—钛铁矿榴辉岩;5—多硅白云母榴辉岩

(a)—The formation temperature of eclogites calculated from equation 1; (b)—the formation temperature of eclogites calculated from equation 2; 1—rutile eclogite; 2—quartz eclogite; 3—hornblende; 4—ilmenite eclogite; 5—phengite eclogite

(张泽明等, 2005)。榴辉岩峰期变质温度是700~890℃。如 Zhang 等(1995)获得东海榴辉岩的峰期变质温度为700~890℃, ZK703孔榴辉岩峰期温度为720~880℃(Zhang et al., 2000), 中国大陆科学钻探卫星孔 PP1和 PP2中榴辉岩峰期温度分别是814~852℃和754~805℃(Liu et al., 2001, 2002)。利用金红石 Zr 温度计,按照公式(1)来计算,只有一个样品金红石榴辉岩(B275R228P1aL)形成温度在峰期温度的下限范围内,按照公式(2)来计算,一个金红石榴辉岩样品(B275R228P1aL)和一个钛铁矿榴辉岩样品(B243R208P1V)形成温度在峰期温度的下限范围内,其他样品按照公式(1)和公式(2)来计算,其温度比峰期温度的下限低30~120℃,但比峰期温度的上限低更多。一种可能的解释是,榴辉岩在折返过程中角闪岩相退变质作用明显,流体活动

强烈,导致金红石中 Zr 扩散丢失,金红石中 Zr 含量不同程度地受到退变质过程中再平衡作用的影响,利用 Zr 温度计计算的金红石温度有偏低的可能。以下几个事实予以佐证:① 榴辉岩的后成合晶较发育,榴辉岩主矿物中存在较多的微裂隙,甚至包体金红石边部见钛铁矿退变边或包体金红石被钛铁矿取代,退变质流体作用的参与,很有可能导致金红石中 Zr 再平衡,致使部分 Zr 在流体作用下扩散丢失;② 退变程度最强的角闪岩中金红石 Zr 含量与弱、中等退变榴辉岩金红石中 Zr 含量基本相同(表 1、3),主孔中各种类型榴辉岩金红石中 Zr 含量平均值大体相同(表 1),表明角闪岩相退变质作用导致金红石中 Zr 发生了均一化作用。

参 考 文 献

- 刘福来,许志琴,杨经绥,张泽明,薛怀明,李天福. 2004. 中国大陆科学钻探工程主孔及周边地区花岗质片麻岩的地球化学性质和超高压变质作用标志识别. 岩石学报, 20: 9~26.
- 刘福来,许志琴,薛怀明,孟繁聪. 2005. 中国大陆科学钻探主孔 0~4500 米变质岩石锆石中保存的超高压矿物包体. 岩石学报, 21(2): 277~292.
- 王汝成,王硕,邱检生,倪培. 2005. CCSD 主孔揭示的东海榴辉岩中的金红石: 微量元素地球化学及其成矿意义. 岩石学报, 21(2): 465~474.
- 徐珏,陈毓川,王登红,余金杰,李纯杰,傅旭杰,陈振宇. 2004. 中国大陆科学钻探主孔 100~2000 米超高压变质岩中的钛矿化. 岩石学报, 20: 119~126.
- 许志琴. 2004. 中国大陆科学钻探工程的科学目标及初步成果. 岩石学报, 20: 1~8.
- 余金杰,等. 2006. 苏北榴辉岩金红石微量元素地球化学特征. 岩石学报, 待刊.
- 张泽明,许志琴,刘福来,游振东,沈昆,杨经绥,李天福,陈世忠. 2004. 中国大陆科学钻探工程(100~2050 米)主孔榴辉岩岩石化学研究. 岩石学报, 20(1): 27~42.
- 张泽明,张金凤,游振东,沈昆. 2005. 苏鲁造山带超高压变质作用及其 P-T-t 轨迹. 岩石学报, 21(2): 257~270.
- Force E R. 1991. Geology of titanium mineral deposits. Geological Society of America Special Paper, 259: 3~14.
- Liu F L, Xu Z Q, Katayama I, Yang J S, Maruyama S, Liu J G. 2001. Mineral inclusions in zircon of para- and orthogneiss from pre-pilot drillhole CCSD-PP1, Chinese continental scientific drilling project. Lithos, 59: 199~215.
- Liu F L, Xu Z Q, Liou J G, Katayama I, Masago H, Maruyama S, Yang J S. 2002. Ultrahigh-pressure mineral inclusions in zircons from gneiss core samples of the Chinese Continental Scientific Site in eastern China. Eur. J. Mineral., 14: 499~512.
- Liu F L, Xu Z Q, Yang J S, Zhang Z M, Xue H M, Li T F. 2004. Geochemical characteristics and UHP metamorphism of granitic gneisses in the main hole of Chinese Continental Scientific Drilling Project and its adjacent area. Acta Petrologica Sinica, 20: 9~26 (in Chinese with English abstract).
- Liu F L, Xu Z Q, Xue H M, Meng F C. 2005. Ultrahigh-pressure mineral inclusions preserved in zircons separated from eclogite and its country-rocks in the main hole of Chinese Continental Scientific Drilling Project (0~4500m). Acta Petrologica Sinica, 21: 277~292 (in Chinese with English abstract).
- Rudnick R L, Ingo Horn M B, McDonough W F. 2000. Rutile-bearing refractory eclogites: missing link between continents and depleted mantle. Science, 287: 278~281.
- Wang R C, Wang S, Qiu J S, Ni P. 2005. Rutile in the UHP eclogites from the CCSD main drillhole (Donghai, eastern China): trace-element geochemistry and metallogenetic implications. Acta Petrologica Sinica, 21(2): 465~474 (in Chinese with English abstract).
- Xu J, Chen Y C, Wang D H, Yu J J, Li C J, Fu X J, Chen Z Y. 2004. Titanium mineralization in the ultrahigh-pressure metamorphic rocks from Chinese Continental Scientific Drilling 100~2000m main hole. Acta Petrologica Sinica, 20: 119~126 (in Chinese with English abstract).
- Xu Z Q. 2004. The scientific goals and investigation progresses of the Chinese Continental Scientific Drilling Project. Acta Petrologica Sinica, 20: 1~8 (in Chinese with English abstract).
- Zack T, Kronz A, Foley S F, Rivers T. 2002. Trace element abundances in rutiles from eclogites and associated garnet mica schists. Chemical Geology, 184: 97~122.
- Zack T, Moraes R, Krone A. 2004. Temperature dependence of Zr in rutile: empirical calibration of a rutile thermometer. Contributions to Mineralogy and Petrology, 148: 471~488.
- Zhang R Y, Hirajima T, Banno S, Cong B L, Liou J G. 1995. Petrology of ultrahigh-pressure rocks from the southern Su-Lu region, eastern China. Journal of Metamorphic Geology, 13: 659~675.
- Zhang Z M, Xu Z Q, Xu H F. 2000. Petrology of ultrahigh-pressure eclogites from the ZK703 drillhole in the Donghai, eastern China. Lithos, 52: 35~50.
- Zhang Z M, Xu Z Q, Liu F L, You Z D, Shen K, Yang J S, Li T F, Chen S Z. 2004. Geochemistry of eclogites from the main hole (100~2050m) of the Chinese Continental Scientific Drilling Project. Acta Petrologica Sinica, 20(1): 27~42 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z M, Zhang J F, You Z D, Shen K. 2005. Ultrahigh-pressure metamorphic P-T-t path of the Sulu orogenic belt, eastern central China. Acta Petrologica Sinica, 21(2): 257~270 (in Chinese with English abstract).

Trace Element Geochemistry of Rutiles in the Eclogites From the Chinese Continental Scientific Drilling Project Main Hole

YU Jinjie¹⁾, XU Jue¹⁾, CHEN Zhenyu¹⁾, WANG Denhong¹⁾, CHEN Yuchuan²⁾,
WANG Pingan³⁾, LI Xiaofeng¹⁾

1) *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037*

2) *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037*

3) *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081*

Abstract

Many kinds of eclogites (e. g. , rutile eclogite, quartz eclogite, ilmenite eclogite, phengite eclogite and hornblendite) can be recognized in the main drillhole of Chinese Continental Scientific Drilling Project. Trace elements such as Nb, Cr and Zr in rutile are measured by electron microprobe with specific operating conditions. Provenance of all kinds of eclogites came from mafic rocks according to their Nb and Cr contents. All kinds of eclogites are characterized by low Nb concentrations. The Nb and Cr content of rutile is about identical from rutile eclogite, quartz eclogite, ilmenite eclogite, and hornblendite. Kyanite phengite eclogite has the highest Nb and Cr contents and its average Nb and Cr concentration is 720×10^{-6} and 712×10^{-6} , respectively. Compared to other eclogite, Kyanite phengite eclogite is more enriched in Cr. Based on a new Zr-in-rutile geothermometer by Zack et al. (2004), Rutile formation temperature of rutile eclogite varies from 608 to 746°C. Rutile formation temperature of quartz eclogite is between 629 and 680°C. Rutile formation temperature of ilmenite eclogite varies from 629 to 704°C. Rutile formation temperature of kyanite phengite eclogite is about 600°C and Rutile formation temperature of hornblendite is about 629°C. When eclogite suffered amphibolite-facies retrograde metamorphism, Strong fluid activity resulted in Zr diffusional loss. So Zr content of rutiles became lower because of Zr diffusional resetting during amphibolite-facies retrograde metamorphism.

Key words: rutile; trace elements; eclogite; provenance; reequilibrium; the Chinese Continental Scientific Drilling Project (CCSD) main hole
