内蒙兴和石墨矿含矿建造特征与矿床成因

王时麒

（北京大学地质系）

内容提要：兴和石墨矿赋存于上集宁群混变质的孔兹岩系中，含矿的原岩建造主要为一套富铝的粘土质和半粘土质浅海相沉积物，岩系的基本特征与印度马德拉斯地区的孔兹岩系类似。前人认为石墨是由碳酸盐经变质作用转变而成，属无机成因。作者据新资料的综合分析认为石墨是大量原始藻类遗体堆积后经成岩作用和变质作用而成，乃属有机成因。

主题词：石墨矿床 孔兹岩系 矿床成因 变质矿床

内蒙兴和石墨矿是我国著名的大型石墨矿床之一。在野外观察的基础上，通过一系列室内工作，本文重点对该矿床的含矿建造、变质作用及矿床成因进行探讨。

一、地 质 概 况

该矿位于内蒙台背斜中段之南部，出露的地层主要是太古界集宁群。该群具有上下两大套不同特征的岩石建造。下部称为葛胡窑组，分布于矿区外围，主要由各种麻粒岩组成。其中以深灰色的中性麻粒岩分布最广，暗色的麻粒岩多呈夹层出现，浅色的酸性麻粒岩出现较少。各种麻粒岩矿物成分的比例不同，但矿物种类基本相同。其中之暗色矿物以紫苏辉石、普通辉石和次透辉石为主，含少量角闪石、黑云母和石榴子石；浅色矿物以斜长石为主，其次为条纹长石和石英；副矿物主要有锆石、磷灰石和磁铁矿。除麻粒岩外，本套岩系中尚有黑云角闪斜长片麻岩、浅粒岩、斜长角闪岩、斜长辉石岩及磁铁石英岩等。这套岩系混合岩化作用除局部较强外，一般并不强烈，主要表现为钾交代微斜长石化。上部称为黄土窑组，广泛分布于矿区内，主要为一套富铝质的片麻岩类，岩石类型有矽线石榴片麻岩、长英片麻岩、石榴长英片麻岩、黑云斜长片麻岩、辉石斜长片麻岩、石墨片麻岩、大理岩等。石墨矿即产于本套岩系中。此套岩系混合岩化作用较强，主要也表现为钾交代。

本区总体看为一封闭的向斜盆地构造，黄土窑组大体呈卵圆形分布于盆地中心，而葛胡窑组围绕黄土窑组分布（图1）。向斜轴向N40°—50°E，中心在落官窑附近。各岩层塑性形变强烈，形成一系列的紧密褶皱。

本区岩浆岩不甚发育，仅出露有一些辉绿岩脉、闪长玢岩脉和花岗伟晶岩脉。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

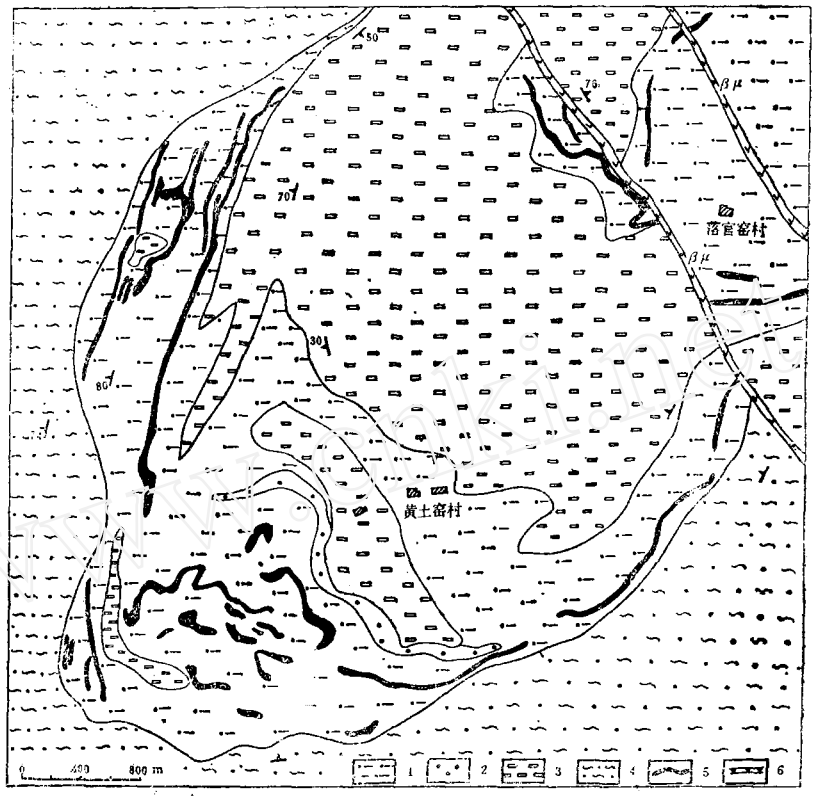

图 1 内蒙兴和石墨矿地质简图

1—矽线榴石片麻岩；2—石榴长英片麻岩；3—辉石斜长片麻岩与黑云斜长片麻岩；4—麻粒岩；5—石墨矿层；6—辉绿岩脉

Fig. 1. Simplified geological map of the Xinghe graphite deposit in Inner Mongolia.
1-Sillimanite garnet gneiss; 2-Garnet felsic gneiss; 3-Pyroxene plagioclase gneiss and biotite plagioclase gneiss; 4-Granulite; 5-Graphite ore bed; 6-Diabase.

二、含矿建造特征

该区石墨矿床产于黄土窑组中，这套地层以富含高铝岩石为特征，与世界上著名的印度马德拉斯地区的孔兹岩系(Khondalite series) 相当。

(一) 岩类学特征

该岩系由下列岩石类型组成。

1．矽线榴石片麻岩类：灰白—灰红色，中粒或中粗粒变晶结构，片麻状构造。主要矿物成分为矽线石、石榴子石、斜长石，其次为正长条纹长石、微斜长石、石英、黑云母、石墨等。副矿物有金红石、磷灰石、尖晶石、磁铁矿、锆石等。此类岩石根据矿物组成可分为矽线榴石片麻岩、黑云矽线榴石片麻岩、含石墨矽线榴石片麻岩、含石墨黑云矽线榴石片麻岩等。

2．长英片麻岩类：岩石一般为灰白色，中粗粒或粗粒变晶结构，弱片麻状或块状构造。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

主要矿物成分为石英和斜长石，次为石榴子石、微斜条纹长石等，副矿物有金红石和锆石等。此类岩石根据矿物组成可进一步分为长英片麻岩、石榴长英片麻岩、含榴长英片麻岩等。

3．黑云斜长片麻岩类：岩石为黑灰色，中粒或中细粒变晶结构，片麻状构造。矿物成分主要为黑云母、斜长石，其次有石英、微斜长石、辉石、角闪石、石墨等，副矿物有磁铁矿、磷灰石、锆石、金红石等。此类岩石根据矿物组合，可细分为黑云斜长片麻岩、含辉石黑云斜长片麻岩、含角闪黑云斜长片麻岩、含石墨黑云斜长片麻岩、黑云二长片麻岩等。

4．辉石斜长片麻岩类：灰黑色，中粗粒变晶结构，弱片麻状构造。主要由普通辉石、透辉石和斜长石组成，其次有石英、黑云母、角闪石、石榴子石、微斜长石等，副矿物有磁铁矿、磷灰石等。此类岩石可细分为辉石斜长片麻岩、辉石二长片麻岩、黑云辉石斜长片麻岩等。

5．石墨片麻岩(即矿层)。

6．大理岩：呈透镜状或夹层状零星分布；具粒状变晶结构，块状构造；主要由方解石、白云石、蛇纹石、透辉石组成。

野外剖面观察查明，该套岩石成层性较好，并具有清楚的韵律变化。典型的韵律为(石榴)长英片麻岩类→含石墨、黑云母、辉石等斜长片麻岩类→矽线榴石片麻岩类。残留的沉积特征明显。

(二) 岩石地球化学特征

1．主要元素地球化学：各类岩石的硅酸盐全分析结果列于表1。总的特点是硅含量较高，铝含量很高，碱质含量较低，$FeO>Fe_2O_3$，与印度马德拉斯孔兹岩对比[6]，有以下的明显特点。

(1) 本区孔兹岩系各类岩石的SiO_2含量变化较大，从52.2—71.44%，平均为62.75%，属中性到酸性岩类。而马德拉斯孔兹岩的SiO_2都大于72%，平均75.05%，属酸性到超酸性岩类，显然比本区更富硅质。

(2)本区孔兹岩系的Al_2O_3含量较高，从13.50—24.43%，平均为17.96%。而马德拉斯孔兹岩的Al_2O_3平均为11.53%。就此而言，本区孔兹岩富铝特征突出，更符合孔兹岩的定义。

(3) 本区孔兹岩系的TiO_2、MnO、MgO、CaO、Na_2O、K_2O、P_2O_5等均高于马德拉斯地区的孔兹岩。

2．微量元素地球化学

对各类典型岩石进行了Rb、Sr、Ba、V、Nb、Zr、Ni、Cr、Co等微量元素测定，测定结果列于表2。总体看来，上述各元素在岩石中的含量变化较大，不同元素之间，含量差别比较悬殊。与马德拉斯孔兹岩相比，一般含量都偏高(表3)。

(1) Ba的含量最高，平均为721.6ppm，变化范围为351.4—1315ppm。Ba和K具良好的正相关关系(图2)，据此分析，Ba主要以类质同象形式代替K存在于各种碱性长石中。

(2) Sr的含量仅次于Ba，平均为245.5ppm，变化范围较大，为83.4—588.6ppm。Sr与K也显示正消长的关系，但不突出(图2)。

(3) Rb的含量较低，平均为84.75ppm，变化范围较宽，为16—178ppm。Rb和K有正消长关系，相关程度似乎比马德拉斯孔兹岩更佳(图2)。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 岩石化学全分析数据表

Table 1. Chemical analyses of the rocks

序号	样号	岩石名称	成分及含量（质量%）													
			SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	H_2O^+	H_2O^-	总计
1	SH-1	石榴长英片麻岩	63.23	0.66	17.97	1.40	6.02	0.13	2.13	2.37	3.48	1.14	0.15	0.88	0.06	99.62
2	SH-3	辉石斜长片麻岩	52.29	1.43	13.58	2.87	12.16	0.28	6.03	8.93	0.54	1.82	0.22	1.43	0.14	99.72
3	SH-6	矽线榴石片麻岩	65.34	0.89	18.54	1.64	6.79	0.13	2.73	0.39	0.49	2.95	0.16	0.75	0.12	100.92
4	SH-8	矽线榴石片麻岩	53.84	0.96	24.43	0.75	9.65	0.14	3.31	0.74	1.79	2.80	0.18	0.59	0.18	99.36
5	SH-9	黑云斜长片麻岩	56.58	0.69	17.37	1.00	3.30	0.09	4.88	5.85	1.25	3.07	0.16	4.79	0.42	99.43
6	SH-10	石榴长英片麻岩	68.66	0.74	13.98	1.55	5.10	0.13	2.70	0.93	2.23	0.91	0.15	1.25	0.30	99.63
7	SH-13	黑云二长片麻岩	71.44	0.47	13.50	0.29	1.50	0.06	1.17	1.28	3.61	6.25	0.17	0.47	0.20	99.41
8	SH-17	长英片麻岩	67.24	0.04	18.83	0.19	1.55	0.09	0.51	3.26	5.65	1.36	0.17	0.52	0.22	99.63
9	SH-21	辉石二长片麻岩	68.46	0.69	13.67	0.94	4.00	0.14	1.12	2.07	2.99	4.55	0.22	0.50	0.10	99.45
本区平均值①			62.75	0.79	17.96	1.13	5.53	0.12	2.79	2.33	2.09	2.66	0.16			
印度马德拉斯孔兹岩平均值[6]			75.05	0.37	11.53	7.24		0.09	1.82	0.38	1.11	2.11	0.04			

①按岩石在岩系中所占厚度为权的平均值；北京大学地质系化学分析室分析

表 2 岩石微量元素分析数据表(ppm)

Table 2. Trace element analyses of the rocks (in ppm)

序号	样号	岩石名称	Rb	Sr	Ba	V	Nb	Zr	Ni	Cr	Co	Rb/Sr	Ni/Co	Ni/Cr	Ba/Pb	Ba/Sr	K/Rb	K/Ba	K/Sr
1	SH-1	石榴长英片麻岩	28	367.8	399.6	106.7	1.4	122.8	26.8	131.4	16.8	0.08	1.59	0.20	14.27	1.09	339	24	26
2	SH-3	辉石斜长片麻岩	49	122.0	518.5	397.4	—	33.7	33.6	137.8	51.5	0.40	0.65	0.24	10.58	4.25	308	29	124
3	SH-6	矽线榴石片麻岩	88	83.4	815.3	133.2	6.1	219.0	13.0	265.5	14.8	1.06	0.88	0.05	9.26	9.77	278	30	294
4	SH-8	矽线榴石片麻岩	75	138.8	843.2	186.6	5.1	260.9	43.3	245.1	41.4	0.54	1.04	0.18	11.24	6.07	309	28	167
5	SH-9	黑云斜长片麻岩	178	177.7	738.3	152.1	8.1	191.9	83.9	152.7	22.6	1.00	3.71	0.55	4.15	4.15	143	35	144
6	SH-10	石榴长英片麻岩	—	241.1	351.4	138.4	11.1	407.4	53.4	157.6	26.0	—	2.05	0.34	—	1.46	—	22	32
7	SH13	黑云二长片麻岩	150	299.3	1315	41.3	24.2	69.8	36.7	30.9	15.6	0.50	2.36	1.19	8.77	4.39	346	39	173
8	SH-17	长英片麻岩	16	588.6	389.8	22.7	20.1	73.6	33.9	23.5	15.0	0.03	2.26	1.44	24.36	0.66	706	29	19
9	SH-21	辉石二长片麻岩	94	191.1	1123	52.1	34.5	439.8	27.9	28.7	20.6	0.49	1.36	0.97	11.95	5.88	402	34	198
平均值			84.8	245.5	721.6	136.7	13.8	202.1	39.2	130.4	24.9	0.51	1.77	0.57	11.82	4.19	354	30	131

北京大学地质系化学分析室分析

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3．稀土元素地球化学

稀土元素全分析结果列于表 4，其球粒陨石标准化型式如图 3。从图表中可见，该区孔兹岩系的共同特征是轻稀土富集，重稀土亏损，但不同岩石类型之间轻稀土的富集程度、重稀土的亏损程度、Eu 的富集或亏损状况和稀土总丰度是不同的。

（1）矽线榴石片麻岩的稀土元素丰度较高，REE型式表现为轻稀土强烈富集，重稀土相对轻微亏损，Eu 中等亏损。这显然是由含有大量具 Eu 负异常和重稀土含量较高的石榴石所决定的。

（2）石榴长英片麻岩的 REE 型式与矽线榴石片麻岩近似，但 Eu 表现为正常或轻度亏损。

（3）辉石二长片麻岩的 REE 型式表现为轻稀土强烈富集，重稀土相对轻微亏损，Eu 具正常。

表 3　兴和与马德拉斯孔兹岩微量元素对比表(ppm)

Table 3. A comparison of trace element contents between Xinghe khondalite and Madras khondalite (in ppm)

	马德拉斯孔兹岩	内蒙兴和孔兹岩
样品数	10	9
Ni	<1	39.2
Rb	56	84.8
Sr	47	245.5
Zr	361	202.1
Nb	8	13.8
Ba	560	721.6
K/Rb	274	354
Rb/Sr	0.95	0.51
Ba/Rb	19.83	11.8
Ba/Sr	20.56	4.2

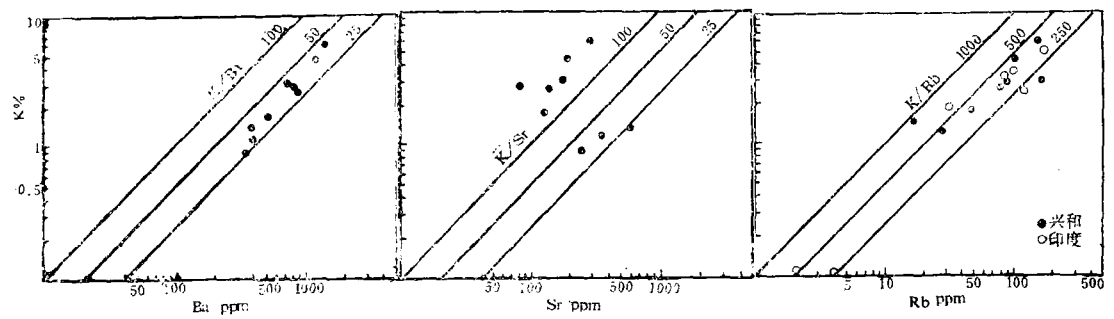

图 2　内蒙兴和孔兹岩K对Ba、Sr、Rb关系图(样品同表2)

Fig. 2. K-Ba, K-Sr and K-Rb diagram for the Xinghe khondalite in Inner Mongolia.

（4）长英片麻岩的REE丰度最低，REE型式表现为轻重稀土强烈分馏。Eu 表现为中等正异常。这可能是由于含有大量具有Eu正异常的斜长石的缘故。

（5）黑云斜长（二长）片麻岩的轻重稀土分离最为强烈，无 Eu异常，但两个样品的总丰度变化较大，相差近 4 倍。

以上可见，孔兹岩系稀土型式变化相当大，这可能反映了它们的物质来源区的多样性和物质来源区内岩石的多样性。与马德拉斯孔兹岩对比，在轻稀土相对富集和富含石榴石岩石的重稀土丰度较高两方面是相同的，不同的是马德拉斯孔兹岩有少量样品显示了轻稀土亏损，而在本区尚未发现。

B. L. Weaver （1979）在研究了马德拉斯地区麻粒岩相岩石的Y_N-$(Ce/Y)_N$的相关性与世界其它地区对比之后指出，Y_N与$(Ce/Y)_N$之间的负相关关系是太古代麻粒岩相岩石的一个

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

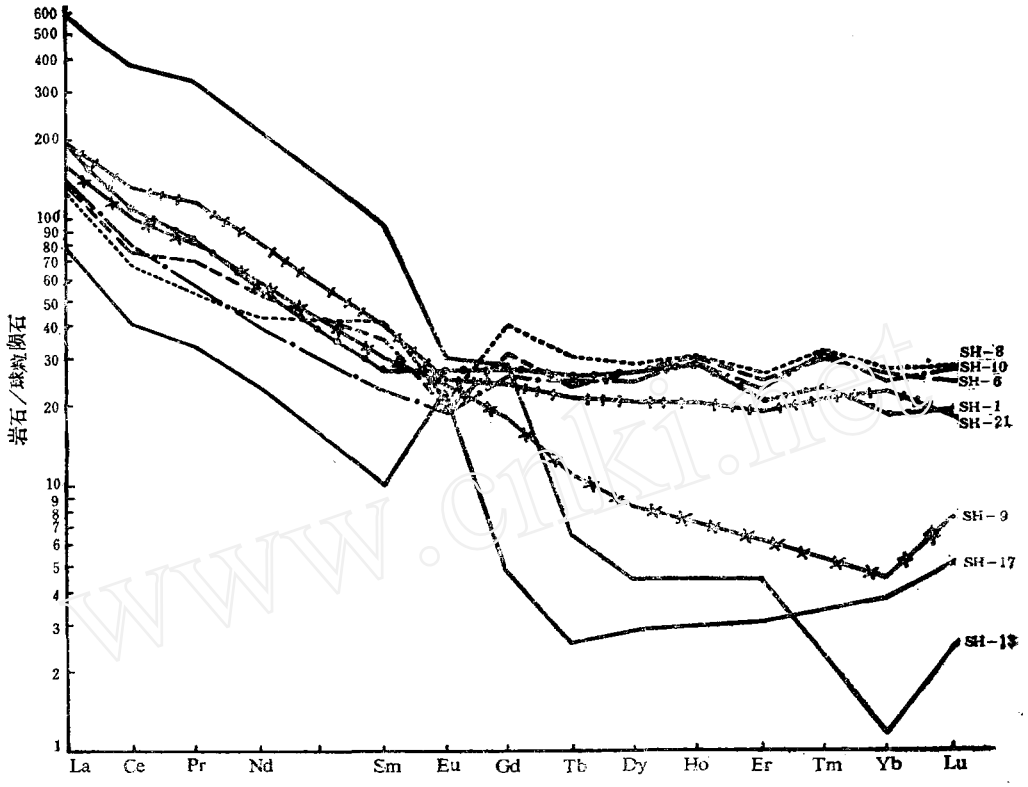

图 3 内蒙兴和孔兹岩稀土元素球粒陨石标准化图式

(样品同表4)

Fig. 3. Chondrite-normalized REE patterns of the Xinghe khondalite in Inner Mongolia.

普遍特点，本区的研究资料也表明了这一点(图4)。

(三) 变质作用的温度和压力

本文主要采用矿物对地质温度计和压力计来估算本区变质岩石形成的温度和压力。

1．石榴子石-黑云母地质温度计

在镜下挑选出共生平衡的石榴子石和黑云母，利用电子探针测定其化学成分，然后经过计算和投影求得温度和压力值。

(1) 格列鲍维斯基图解法[4]：求得温度(℃)为670、700，压力(GPa)为0.75和0.8。

(2) 别尔丘克图解法[4]：求得温度(℃)为690、710、730、735，压力(GPa)为0.86、0.9、1、1.1。

2．二长石温度计[3]

在镜下挑选出平衡共生的斜长石和微斜长石，用电子探针测定化学成分，然后经过计算代入鲍维尔二长石温度计公式，求得温度(℃)为716、722、730、735、748、750。

综合以上几种方法，可以看出，本区孔兹岩的变质温度大约为670—750℃，变质压力大约为0.75—1 GPa。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 4　岩石稀土元素分析数据表(ppm)

Table 4. REE analyses of the rocks

序号	样　号	岩　石　名　称	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho
1	SH-1	石榴长英片麻岩	63.50	98.78	9.62	34.15	4.93	1.90	7.18	1.22	8.53	1.99
2	SH-6	矽线榴石片麻岩	45.35	69.09	7.90	32.74	6.67	1.35	7.59	1.17	8.57	2.14
3	SH-8	矽线榴石片麻岩	40.01	60.40	6.01	26.32	7.61	1.46	9.85	1.46	9.02	2.16
4	SH-9	黑云斜长片麻岩	52.17	88.72	9.13	36.32	5.39	1.70	4.47	0.54	2.68	0.81
5	SH-10	石榴长英片麻岩	45.43	70.41	6.56	24.38	4.20	1.33	6.53	1.22	7.86	2.01
6	SH-13	黑云二长片麻岩	196.40	330.40	38.07	136.70	17.41	2.21	7.32	0.30	1.41	1.30
7	SH-17	长英片麻岩	25.69	35.80	3.79	14.29	1.82	1.60	1.16	0.12	0.92	0.35
8	SH-21	辉石二长片麻岩	63.71	116.40	13.34	50.22	7.26	1.65	5.89	0.93	6.52	1.47

序号	样　号	岩　石　名　称	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	Y_N	$(Ce/Y)_N$	$(La/Yb)_N$
1	SH-1	石榴长英片麻岩	4.12	0.70	3.69	0.63	43.34	240.57	22.11	5.08	10.68
2	SH-6	矽线榴石片麻岩	5.05	0.90	5.13	0.83	47.49	194.47	24.23	3.24	5.35
3	SH-8	矽线榴石片麻岩	5.18	0.96	5.55	0.91	47.53	176.70	24.25	2.83	4.54
4	SH-9	黑云斜长片麻岩	2.21	0.42	0.90	0.26	11.64	204.72	5.94	16.97	35.20
5	SH-10	石榴长英片麻岩	4.70	0.94	5.00	0.90	43.84	181.47	22.37	3.58	5.51
6	SH-13	黑云二长片麻岩	0.92	0.26	0.23	0.09	2.67	733.01	1.36	276.10	529.02
7	SH-17	长英片麻岩	0.63	0.15	0.77	0.17	5.09	87.26	2.60	15.65	20.17
8	SH-21	辉石二长片麻岩	3.72	0.63	4.44	0.63	39.01	276.87	19.90	6.65	8.70

北京大学地质系化学分析室

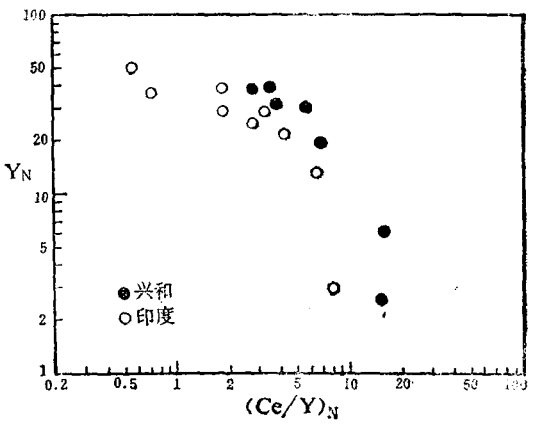

图 4　Y_N对$(Ce/Y)_N$关系图

Fig. 4. Y_N against $(Ce/Y)_N$ diagram.

（四）原岩恢复

对本区深度变质的孔兹岩系的原岩恢复，作者主要以野外岩石产状和组合特点为基础，以岩石化学方法为主要依据，再参考一些矿物和地球化学标志进行综合判断。

1．野外岩石产状观察：前已叙及，通过野外多个剖面的系统观察，该套岩石成层性较好，并具有清楚的韵律变化，沉积特征明显，岩系总体显示副变质岩面貌。

2．岩石化学方法：

(1) D. M. 肖判别式

$$DF=10.44-0.21SiO_2-0.32Fe_2O_3(全铁)-0.98MgO+0.55CaO+1.46Na_2O+0.45K_2O$$

公式中所有的氧化物量都以质量百分数计。若$DF>0$，为正变质岩；若$DF<0$，则为副变质岩。该公式的使用条件是岩石的$SiO_2>53.5\%$，本文 9 个样品都满足此条件。

(2) P. 尼格里的四面体图解

(3) A. 西蒙南的尼格里值$(al+fm)-(c+alk)$对Si图解

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 5 岩石化学计算数值表

Table 5. Petrochemical calculations

序号	样号	D. M. 肖 DF 值	尼格里数值 al	fm	c	alk	c/fm	Si	周世泰 K	A
1	SH-1	−0.52	40	35	10	15	0.29	238	25	72
2	SH-3	−6.11	21	56	19	4	0.34	136	77	59
3	SH-6	−6.38	44	45	2	10	0.04	263	86	83
4	SH-8	−3.25	44	42	2	11	0.05	166	61	82
5	SH-9	−1.01	34	36	21	11	0.58	186	71	63
6	SH-10	−4.13	37	42	9	12	0.21	303	29	73
7	SH-13	+1.55	42	17	7	34	0.41	373	71	57
8	SH-17	+5.98	48	10	15	27	1.50	280	19	65
9	SH-21	+1.21	37	27	10	27	0.37	312	60	59

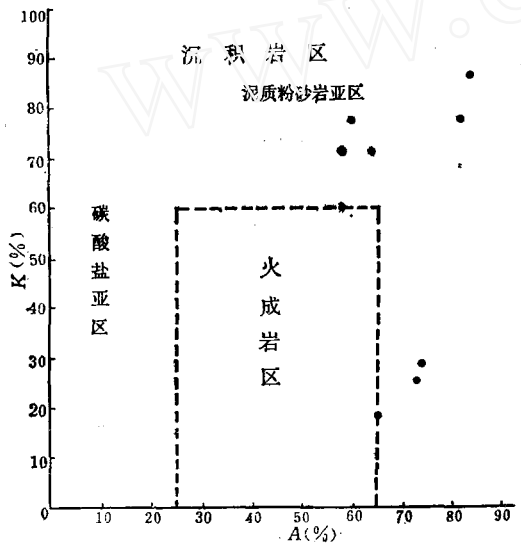

图 5 K对A关系图

Fig. 5. K against A diagram.

(4) 周世泰的K-A相关图解

上述四种方法的计算结果和图解投影表示在表 5 和图 5 中。

3. 地球化学方法：主要用微量元素特征来作为恢复原岩的依据。目前流行的方法很多，其中Ba/Sr比一般对判定沉积岩效果较好。因为沉积岩中Sr的含量比火成岩低得多，因此认为可以Ba/Sr =1为指标来区分正副变质岩，即Ba/Sr>1为副变质岩，Ba/Sr<1为正变质岩。本文采用此比值（表 2）作为恢复原岩的参考。

4. 特征矿物：本区孔兹岩系的许多岩石含有石墨。而根据对石墨的碳同位素测定结果属有机成因（详见后述），显然这些含石墨的岩层原岩应是沉积的。

综合以上各种方法所获结果进行全面分析，可以对本区各类变质岩石的原岩予以判别：

(1) 矽线榴石片麻岩：用以上各种方法判别结果均为副变质岩，因此判其为沉积的铝土页岩。

(2) 黑云母斜长片麻岩：DF值为负值，在P. 尼格里图和A. 西蒙南图上投点在火成岩和沉积岩交界处，在周世泰K-A图上投点在泥质岩区，Ba/Sr 比为4.15，含有石墨，因此判断其为半粘土质岩石和粉砂质泥岩。

(3) 石榴长英片麻岩：DF值为负值，在 P. 尼格里图上投点在火成岩和沉积岩交界处，在A. 西蒙南图上投点在泥岩区，在K-A图上投点在沉积岩区，含有石墨，Ba/Sr>1，因此判断其原岩为沉积的泥质粉砂岩。

(4) 黑云二长片麻岩：DF值为正值，在P. 尼格里图和A. 西蒙南图上投点在火成岩区，

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在K-A图上投点在泥质岩区，Ba/Sr比为4.39，综合考虑其原岩可能为--种含火山凝灰质的半粘土质粉砂岩。

（5）长英片麻岩：DF值为正值，在P.尼格里图和K-A图上投点在火成岩和沉积岩交界处，在A.西蒙南图上投点在火山岩区，Ba/Sr＜1，据此应判别为正变质岩。但从野外产状看，成层性好，和含石榴长英片麻岩呈过渡关系，多层重复出现具有良好的韵律性，应为沉积的长石石英砂岩。

（6）辉石片麻岩类：DF有正有负，在各种投影图上投点或者在火成岩区或在火成岩与沉积岩交接处，Ba/Sr＞1。这一类岩石的原岩不十分明确，有一部分可能为中性的火山凝灰岩。

（7）大理岩：据含有蛇纹石、透辉石等富镁矿物，可判定其原岩为钙质白云岩。

总结上述分析，本区孔兹岩系基本上由沉积岩组成，主要是以富铝的粘土岩和半粘土岩为主的一套泥砂质沉积，包括铝土页岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、长石石英砂岩及少量碳酸盐岩等，其中可能有一些火山岩类。

三、矿床地质特征

兴和石墨矿床赋存于一定的层位，从区域上看矿层产出在上集宁群黄土窑组孔兹岩系的底部。矿体呈多层产出，与围岩呈整合接触，直接围岩为黑云母斜长片麻岩、矽线榴石片麻岩、石榴长英片麻岩。

（一）矿体的形态和产状

含矿岩系中的各层岩石普遍含有浸染状石墨，但构成矿体（工业品位＞3％的石墨片麻岩）的主要有三大层。由于石墨矿层塑性较强，在其受到褶皱断裂作用时，形态变化很大，造成矿层倒转、拉薄、变厚、透镜体化、众多矿层重复出现。在平面上，矿体呈弧形分布，走向近东西到北东而后转向北西，倾角一般为50°—60°，局部直立或倒转。矿体多呈层状或似层状，少数呈透镜状。矿体长度从400m至3500m，--般长500m至1000m。矿体厚度从4m至40m，平均厚度约20m。矿层内常见有花岗质细脉和伟晶岩脉，在其接触处，矿石的粒度变粗、品位变富。

（二）矿石的成分和结构构造

矿石为深灰色，风化面呈褐黄色，片麻状构造，鳞片状花岗变晶结构。

矿石的矿物成分主要为斜长石、石英、微斜长石、石墨，局部含黑云母和角闪石较多，有时见有少量普通辉石，另有微量黄铁矿。

矿石的化学成分：含碳量一般为2.5—5％，局部高达8.71％，低者为0.5％，平均为4.1％，属贫矿石。全硫含量为0.01—3.96％，多数为0.01—0.1％。内在水分--般为0.5—2％，灰分为88—98％，一般为91—95％。

（三）石墨的矿物学特征

石墨为钢灰色，半金属光泽，鳞片状，鳞片大小一般为1—1.5mm，片厚一般为0.027—0.054mm，属粗鳞片状石墨。与伟晶岩脉接触处因重结晶作用，粒度进一步变粗，一般为3—5mm，大者可达1.5—2cm。经测定密度为2.2543g/cm³。在反光显微镜下观察，石墨呈现

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

各向异性，具有强烈的双反射，其强度随着光片方位不同而变化。在光片上选择平行于〔0001〕面解理面测定其反射率，结果见表6。一般角闪岩相和麻粒岩相产出的石墨，其最大反射率大于9。本区石墨均大于此值，反映属于高级变质程度的产物。

使用X光衍射法，对4个石墨矿物样品进行了结构分析。测试结果（表7）表明本区石墨

表6 石墨反射率测定值

Table 6. Reflectivity of graphite

样品号	波长550	波长540
C-A-1	16.80—15.16	16.68—15.30
C-A-2	15.96—11.51	15.85—11.88
C-A-3	17.55—12.14	17.70—12.23
C-A-4	14.74—11.62	14.76—11.66

表7 石墨结构类型、面网间距和石墨化程度

Table 7. Textural type, net plane distance and graphitization degree of graphite

样品号	结构型	面网间距$d_{0.2}$	石墨化程度U
C-1	2H	3.3559	0.8513
C-2	2H、3R	3.3552	0.8819
C-3	2H	3.3546	0.9165
C-4	2H	3.3540	1.0000

基本上为六方晶系2H型，其中有一个样品(C-2)有少量的三方晶系3R型。据研究，石墨中3R相的含量变化在5%—35%之间，其数量是随着变质程度的增强而逐渐减少。本区为深变质环境，石墨的3R相自然很少。

从煤转变为石墨，从低级变质石墨转变为高级变质石墨，其晶体结构状态随之发生变化。这种石墨化程度可以利用X光测定的面网间距值经过计算定量地表示出来❶。

$$U=1-P \qquad (1)$$

$$d_{002}=3.440-(3.440-3.354)(1-P^2)\times 10^{-10}\text{m} \qquad (2)$$

U代表石墨化程度，它是以斯里兰卡麻粒岩相具有最高结晶程度的完整晶形的石墨作为标准。即$U=1$；P为富兰克林参数；d_{002}为样品的面网间距；3.440×10^{-10}m为无序结构面网间距；3.354×10^{-10}m为理想石墨晶体面网间距。

首先根据X光衍射获得的面网间距d值代入公式（2），求出P值，然后将P值代入公式(1)即得U值。从计算结果(表7)可以看出，本区的石墨化程度比较高，为0.85—1，这与本区的深变质相是一致的。

差热分析是研究石墨成因的重要手段，其最大放热峰值可以反映石墨的变质程度，一般绿片岩相为400℃—700℃，角闪岩相为700℃—850℃，麻粒岩相大于850℃。对本区三个石墨矿物样品进行了差热分析，所获得的三个最高放热峰值为815℃、820℃和815℃，相当于高级角闪岩相的值域。

四、矿床成因

世界上大多数显生宙石墨矿床产于变质的含煤沉积岩系内，矿体一般呈层状，与周围的变质沉积岩整合，石墨是由煤层经接触变质或区域变质而成，标志比较明显，成因比较明

❶ 刘绍斌，1983，天然石墨的矿物学研究，建材地质，第1期

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

确。而产于前寒武纪中—高级区域变质片岩和片麻岩中的石墨矿床，由于产状比较复杂，变化比较大，缺少明确的成因标志，对其成因提出了许多不同看法，长期争论不休。概括起来，基本上是两大派，即有机成因说和无机成因说。

关于兴和石墨矿床的成因，内蒙203地质队（1961）认为该区石墨矿是"由碳酸岩层经剧烈的区域变质作用结晶分离出石墨而成"，沈宝琳❶（1980）认为该区石墨矿"系由富铁镁质及泥质之碳酸盐类沉积岩，经剧烈的区域变质作用及后期动力变质作用，使碳酸气化运移而富集，重结晶而形成石墨矿床"。

作者在本次研究中，经过野外观察和室内工作，特别是碳同位素的工作，提出了与前人不同的观点，认为该区石墨矿床不是无机成因，而是有机成因。

1．该区含矿岩系内碳酸盐岩的量很少，仅在孔兹岩系的底部有一断断续续的大理岩层，多呈透镜状，厚度也不大，平均厚2—3m，其量远远小于层位多、厚度大的石墨矿层，而且也没有见到碳酸盐岩与石墨矿层直接接触的现象，更没有见到碳酸盐岩中有石墨矿物。因此无论从量比上和具体产出关系上分析，石墨矿床由碳酸盐岩经变质作用演变而来是不太可能的。

2．对该矿多种产状的石墨矿物和大理岩层中的碳酸盐矿物进行的碳同位素的测定结果见表8。石墨的$\delta^{13}C_{PDB}$值为－20.49——－24.13‰，平均值为－21.51‰，碳酸盐矿物的

表8　碳同位素测定值

Table 8.　Carbon isotopic determinations

样　号	矿　物	$\delta^{13}C_{PDB}$(‰)	平均值$\delta^{13}C_{PDB}$(‰)
C-1	石　墨	－20.49	
C-2	石　墨	－20.78	－21.51
C-3	石　墨	－20.64	
C-4	石　墨	－24.13	
大-1	方解石	＋0.97	
大-2	方解石	－4.23	－2.43
大-3	方解石	－4.03	

$\delta^{13}C_{PDB}$值为＋0.97——－4.23‰，平均值为－2.43‰。这表明两者的碳同位素值绝然不同，不是同源。大理岩中的碳属一般海相碳酸盐碳，而石墨的碳属有机碳。从而可以证明该区的石墨矿床不是无机成因，而是有机成因。

J. J. Mancuso[8]（1981）在研究了美国和斯里兰卡的一些前寒武纪石墨矿层后，指出在前寒武纪沉积物中有以碳沥青形式存在的足够的高度富集和纯的有机碳这个事实，可用来解释在前寒武纪片岩和片麻岩中存在的石墨矿床。本区含矿岩系是一套以富铝粘土岩为主的沉积岩系，从岩相特征分析，属相对宁静的浅海沉积环境，这种环境适合藻类的生长，大量的藻类遗体被埋藏在泥砂沉积物中，经过成岩作用形成了碳质页岩，后经区域变质作用则形成了石墨矿床。

参考文献

〔1〕 钱祥麟等　1985　内蒙冀东太古界麻粒岩相带的演化（地质研究论文集）　北京大学出版社

❶ 沈宝琳，1980，内蒙兴和石墨矿区控矿构造形迹的初步认识，建材地质，第1期

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

〔2〕 崔文元 1982 卓资—阳高一带麻粒岩相岩石的原岩恢复及其地球化学特征 矿物岩石 第4期
〔3〕 张儒瑗、从柏林 1983 矿物温度计和矿物压力计 地质出版社
〔4〕 靳士琴等 1986 成因矿物学概论 吉林大学出版社
〔5〕 张秋生等 1984 中国早前寒武纪地质及成矿作用 吉林人民出版社
〔6〕 Windley, B. F. and Napqi, S. M., 1978, Archean Geochemistry, pp. 177—203.
〔7〕 Hollister, V. F., 1980, Origin of graphite in the Duluth Complex. Economic Geology, Vol. 75, pp. 764—766.
〔8〕 Mancuso, J. J. and Seavoy, R. E., 1981, Precambrian coal or anthraxolite: A source for graphite in high-grade schists and gneisses. Economic Geology, Vol.76, pp. 951—954.

CHARACTERISTICS OF ORE-BEARING FORMATION AND GENESIS OF THE XINCHE GRAPHITE DEPOSIT IN INNER MONGOLIA

Wang Shiqi

(Department of Geology, Peking University, Beijing)

Abstract

The Xinghe graphite deposit occurring in khondalite series of Upper Jining Group is one of the well-known graphite mines in China.

The main types of metamorphic rocks in the ore district include sillimanite-garnet gneiss, felsic gneiss, pyroxene gneiss, biotite-plagioclase gneiss, graphite gneiss etc. The contents of the main elements in these rocks are characterized by high Si, Al, low K, Na and $FeO > Fe_2O_3$. The chondrite-normalized REE patterns show the enrichment of LREE and the deficiency of HREE. The contents of such minor elements as Ni, Rb, Sr, Nb and Ba are higher than those of the Madras khondalite in India. The metamorphic temperature is in the range of 670—750℃, and the metamorphic pressure 0.75—1GPa. The original rocks comprise bauxitic shale, silty mudstone, pelitic siltstone, feldspathic quartz sand stone and a few volcanic rocks.

The graphite ore beds, which occur in the lower part of the khondalite series, consist of three ore layers containing nine orebodies, with the average ore grade being 4.1 per cent. The graphite is coarse lepidosome in form and has average $\delta^{13}C_{PDB}$ value of $-21.51‰$. Some previous researchers hold that the deposit is of inorganic origin; that is to say, the graphite was formed as a result of the metamorphism of carbonates.

Based on an integrated analysis of the new data, the author considers that the ore deposit is of organic orgin, and the graphite was formed through the metamorphism of large quantities of algal remains.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net