

陕西勉县庙坪石墨矿床地球化学特征 及成矿机制研究

汤贺军^{1,2)}, 张宝林³⁾, 吴珍汉^{1,2)}, 孟贵祥^{1,2)}, 张国梁³⁾, 张文斌⁴⁾

1) 中国地质科学院, 北京, 100037; 2) 中国地质调查局-中国地质科学院地球深部探测中心, 北京, 100037;
3) 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京, 100029; 4) 陕西省核工业地质局二一四大队, 陕西汉中, 723200

内容提要:新发现的勉县庙坪石墨矿床位于南秦岭勉略缝合带, 工业类型为晶质鳞片状石墨矿石。本文对该矿床进行地球化学特征研究, 并探讨其成因机制。研究表明, 含矿岩石黑云母变粒岩 Al_2O_3 含量为 7.32%~15.01%、 $TFeO$ 为 2.28%~8.68%、 Na_2O 为 0.17%~3.38%、 K_2O 为 1.15%~3.42%、 TiO_2 为 0.50%~0.80%, 稀土元素总量为 $106.38 \times 10^{-6} \sim 236.37 \times 10^{-6}$; 黑云母变粒岩具有明显的 Eu、Sr 负异常, U、Cs、Pb 的正异常, Ce 异常不明显。通过对本区变质原岩恢复、沉积环境及原岩物质来源分析可知, 矿区变质岩原岩应为沉积岩, 具有泥质砂岩、粉砂岩的特征, 变质岩系原岩主要形成于缺氧还原的海洋沉积环境。碳同位素分析显示, 矿石中石墨的 $\delta^{13}C$ 为 $-23.6\text{‰} \sim -21.7\text{‰}$, 大理岩的 $\delta^{13}C$ 为 $-7.1\text{‰} \sim 3.3\text{‰}$, 石墨中的碳质来源主要为生物有机质, 而大理岩的碳质来源为无机碳。本区经区域变质作用, 使含碳质岩石富化成矿, 矿床成因应属沉积变质型矿床。

关键词: 勉县庙坪; 石墨矿; 地球化学; 碳同位素; 成因机制

石墨是煤或含炭岩石受到变质作用或岩浆作用而形成的产物, 是新兴产业发展的重要原材料, 逐渐成为战略性新材料。近年来, 石墨在新能源电池应用越来越广泛, 许多国家正积极致力于研究开发应用清洁能源, 随着石墨资源战略意义加重以及环保的要求, 我国对石墨矿的需求将会越来越大。

我国石墨矿产资源丰富, 陕西南秦岭印支褶皱带其良好的地质成矿环境是南秦岭石墨矿的集中区, 许多学者在该区域做了大量的工作, 对诸多石墨矿床做了细致的研究, 如留坝县青桥河石墨矿、佛坪县唐湾石墨矿、城固县板凳河石墨矿、洋县铁河石墨矿、勉县庙坪石墨矿等 (Tu Huaikui, 2005; Zhao Fulai et al., 2014; Tang Hejun et al., 2015; Li Fangzhou et al., 2017; Bai Wenlong et al., 2019)。最近, 汉中地区洋县窑坪乡铁河地区新发现了 3 条较大规模的石墨矿带, 预估矿物量 200 万 t, 陕西自然资源厅在成矿地质条件好的勉县-城固北

部和丹凤北部两个区域开展了为期两年的石墨找矿大会战, 力争探明石墨矿物量 1300 万 t, 可见汉中地区具有良好的石墨矿成矿条件。本文采用全岩主微量元素分析、碳同位素分析等手段, 研究汉中勉县庙坪石墨矿床的地球化学特征, 深入探讨矿床成因, 为该区找矿工作提供相应的理论依据, 同时对南秦岭褶皱带同类型矿床的研究和找矿前景预测分析具有重要的借鉴意义。

1 区域成矿地质背景

研究区位于陕西省南部、汉中盆地以北, 地处扬子板块北缘勉略缝合带北端与南秦岭褶皱带相毗邻地区 (图 1)。区域出露地层主要有下元古界、震旦系、志留系、泥盆系、石炭系地层 (Zhang Guowei et al., 2004; Wang Tao, 2008), 另外在区域东南分布第四系砂砾覆盖物。区内志留纪地层以碎屑岩与泥质岩构成的复理石建造为特征, 并见炭质页岩系

注: 本文为国家重点研发计划专项课题 (编号 2018YFC0604002), 中国地质调查局项目 (编号 DD20190071、DD20190012), 中国地质科学院基本科研业务费项目 (编号 JKY201908-02) 联合资助的成果。

收稿日期: 2020-03-15; 改回日期: 2020-09-29; 网络发表日期: 2021-04-20; 责任编委: 毕献武; 责任编辑: 李曼。

作者简介: 汤贺军, 男, 1987 年生。博士研究生, 助理研究员, 主要从事矿产资源勘查及矿床学研究。E-mail: tanghejungeo@163.com。通讯作者: 张宝林, 男, 1963 年生。研究员, 主要从事隐伏矿床定位预测理论与技术研究。E-mail: blzhang@mail.iggcas.ac.cn。

引用本文: 汤贺军, 张宝林, 吴珍汉, 孟贵祥, 张国梁, 张文斌. 2021. 陕西勉县庙坪石墨矿床地球化学特征及成矿机制研究. 地质学报, 95(8): 2509~2520, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021210.

Tang Hejun, Zhang Baolin, Wu Zhenhan, Meng Guixiang, Zhang Guoliang, Zhang Wenbin. 2021. Geochemical characteristics and genetic mechanism of the Miaoping graphite deposit in the Mianxian County of Shaanxi Province. Acta Geologica Sinica, 95(8): 2509~2520.

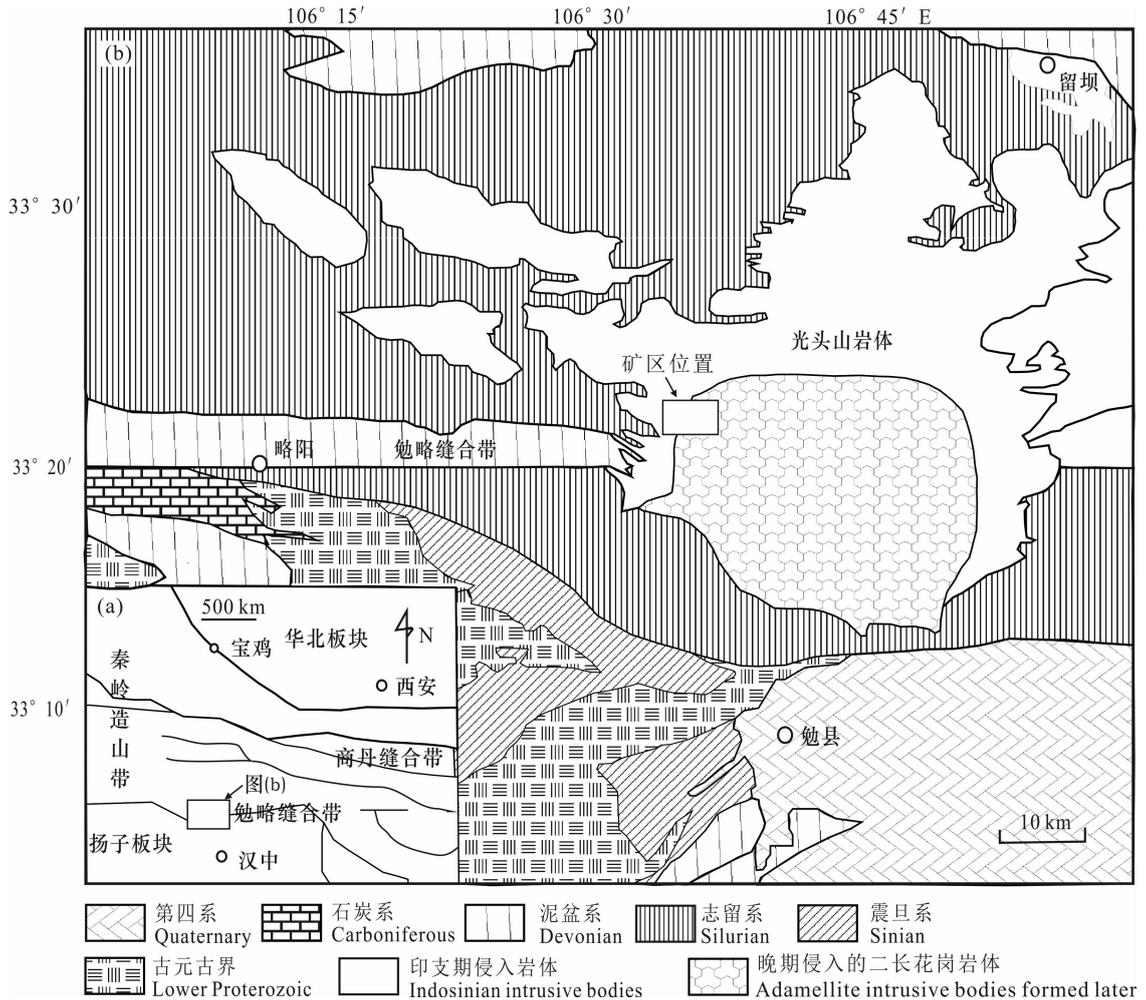


图1 陕西勉略地区大地构造位置图(a)及庙坪矿区区域地质简图(b)(after Wu Fenghui et al., 2009)

Fig. 1 The tectonic position of the Mianxian-Lüeyang area, Shaanxi Province (a) and Regional geological sketch map of the Miaoping ore area (b) (after Wu Fenghui et al., 2009)

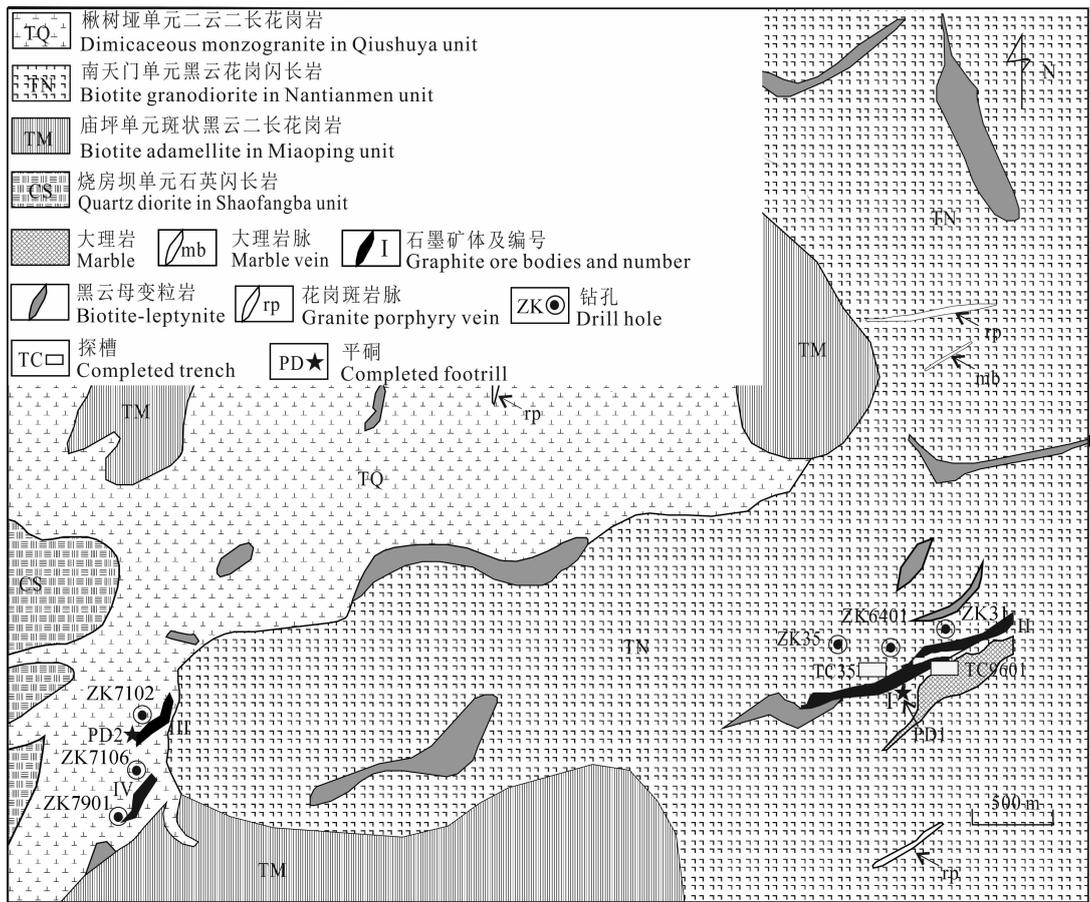
及少量碳酸盐岩。研究区内岩浆活动频繁,均为侵入岩,主要为印支期光头山超单元,侵入时代为三叠纪,呈近等轴状岩基侵位于勉略缝合带以北,出露面积约 900 km²,岩石类型为一套中酸性到酸性花岗岩体(Zhang Chengli et al., 2005)。Sun Weidong et al. (2000)测得勉略缝合带北侧的光头山花岗岩锆石 U- Pb 年龄为 216±2 Ma,并据此认为光头山岩体属于印支期扬子和华北板块碰撞过程中的同碰撞型花岗岩;Wu Fenghui et al. (2009)测得糜棱岩化英云闪长岩的年龄是 221±6 Ma,二长花岗岩的年龄是 199±4 Ma,认为光头山岩体为两个阶段侵位,早期的英云闪长岩可能在勉略洋盆闭合前的岛弧发育阶段侵位,晚期二长花岗岩为秦岭主造山期同碰撞岩浆活动的产物。

秦岭造山带经历了元古宙古裂谷的形成与发展、新元古代晚期—中生代初期的板块构造演化阶

段及中生代以来的陆内造山三个重要演化过程,构筑了现今华北、扬子及其之间的秦岭微地块和分隔这些块体的商丹、勉略缝合带为主要格架的“三块、两缝”的构造格局(Zhang Guowei et al., 2004)。勉略缝合带物质成分非常复杂,经过燕山期的造山运动,使带内物质发生变形、剪切、旋转和变位。由于区域内发生了较强的变质作用,形成了金、银、钒、石墨等多种矿产,并且使得区域上具有多时代的沉积变质型石墨特点,构成南秦岭石墨矿成矿带(Li Mingchang, 1992; Tu Huaikui, 2005; Li Fangzhou et al., 2017),勉县庙坪石墨矿处于该成矿带西段。

2 矿区地质特征

矿区地层出露面积较小,约占工作区总面积 3%,地层均以光头山岩体捕掳体形式存在(图 2)。经与区域地层对比研究,矿区地层仅由下古生界志

图 2 勉县庙坪矿区地质图^①Fig. 2 Geological map of the Miaoping graphite deposit, Mianxian County^①

留系中统舟曲岩组组成(Fu Lipu et al., 1983; Wang Tao, 2008; Wang Zongqi et al., 2009)。

志留系舟曲岩组上部岩性主要为碳质板岩夹少量粉砂岩;中部为深灰色黑云母变粒岩、黑云母石英变粒岩,局部含少许大理岩及混杂岩;下部为灰色二云石英片岩、石英变粒岩、含石榴黑云变粒岩,厚度约为 1300 m。该岩段横向展布较为稳定,仅受光头山花岗岩体侵入呈不规则透镜状、似层状、条带状。

本组中部深灰色黑云母变粒岩、黑云母石英变粒岩即是矿区品质石墨的矿化层位,也是出露最广的地层。整体岩层走向呈北东东向,倾向呈北北西向,两侧均与围岩花岗岩呈侵入接触关系。

3 矿体特征及样品采集位置

矿区内已发现的主要矿体有 4 条,分别为 I 号、II 号、III 号、IV 号。矿体走向整体呈南西—北东向,矿体形态呈断续豆荚状、透镜状、条带状展布。矿体主要由含石墨黑云母变粒岩组成,呈粒状变晶结构,定向构造,主要矿物斜长石含量 20%~60%、石英含量 10%~75%、黑云母 5%~49%,次要矿物晶质

石墨含量 3%~10%、黄铁矿、白云母均少量,固定碳平均含量为 5.3%。

矿体上下盘围岩以大理岩、细粒花岗闪长岩及二长花岗岩为主,矿体呈捕虏体形式存在,与围岩接触界线较清楚(图 3)。接触部位矿物成分多受后期蚀变影响,片理发育,局部矿体与围岩呈互层状。

矿区围岩蚀变类型主要有黄铁矿化、褐铁矿化、绿泥石化、碳酸盐化、硅化,另有少量的钠长石化、绿帘石化、绢云母化等。其主要蚀变特征叙述如下。

黄铁矿化:主要见于钻孔中,在黑云母变粒岩和二云二长花岗岩中均有分布。呈浸染状均匀分布于岩石中,或呈薄膜状、团块状沿层面或节理裂隙分布,脉宽一般 1~10 mm,团块直径最大可达 1 cm,呈他形、半自形晶。绿泥石化:主要由角闪石蚀变形成,在黑云母变粒岩和二云二长花岗岩、石英岩中均有分布,呈浸染状分布。碳酸盐化:分布比较普遍,在各类岩石及构造破碎带均可见到。表现为方解石细脉以及钙质胶结物,脉体呈白色,斜交或顺片麻理

表1 勉县庙坪石墨矿床含矿岩石主(%)微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果Table 1 Major (%) and trace ($\times 10^{-6}$) element compositions of ore bearing rock of the Miaoping graphite deposits, Mianxian County

样品编号	PD1-H26	ZK7106-106	ZK7901-197	PD2-H14	ZK6401-13	ZK6401-63.3	ZK7102-8	ZK31-28
岩性	含石墨黑云母变粒岩							
SiO ₂	58.27	77.69	61.15	67.65	68.62	54.01	59.96	75.61
TiO ₂	0.67	0.61	0.80	0.51	0.71	0.62	0.76	0.50
Al ₂ O ₃	8.75	10.06	15.01	10.20	13.03	7.32	10.97	10.95
TFe ₂ O ₃	4.76	2.25	8.68	2.29	4.68	4.12	5.21	2.75
MnO	0.05	0.03	0.08	0.03	0.04	0.09	0.05	0.04
MgO	3.33	0.94	3.52	1.42	1.66	4.51	3.05	1.37
CaO	4.53	1.20	1.50	2.71	2.49	3.68	3.49	2.42
Na ₂ O	0.17	2.60	3.32	1.11	3.38	0.20	0.30	2.84
K ₂ O	2.42	2.78	3.16	2.58	1.64	1.98	3.42	1.15
P ₂ O ₅	0.67	0.20	0.16	0.16	0.20	0.99	0.56	0.11
LOI	13.18	1.28	2.38	10.41	3.18	21.46	11.92	1.56
总量	96.80	99.63	99.76	99.07	99.63	98.97	99.68	99.31
L	78.3	31.4	128	44.1	28.1	94.4	63.8	32.5
Be	1.95	1.44	2.23	3.09	3.40	2.64	2.99	2.40
Sc	11.7	8.48	18.8	7.86	13.3	17.9	12.4	8.63
V	1621	72.0	171	231	159	2741	1256	80.2
Cr	309	193	202	143	216	387	325	205
Co	13.3	5.98	16.5	9.75	13.1	12.6	12.8	7.71
Ni	311	27.7	56.3	91.4	73.3	450	133	51.6
Cu	208	31.3	39.8	63.9	55.7	127	104	33.8
Zn	435	60.9	251	108	136	429	276	78.5
Ga	14.1	10.7	27.2	12.5	18.1	15.1	16.7	12.5
Rb	134	102	261	127	115	140	260	70.4
Sr	180	148	172	231	234	71.5	94.4	261.6
Y	90.7	26.8	42.2	34.9	22.3	123	79.9	19.5
Zr	157	278	190	133	197	116	227	130
Nb	7.80	11.2	18.5	14.9	14.1	8.25	18.1	9.59
Cs	7.99	3.83	11.5	6.81	5.20	14.8	9.42	2.94
Ba	2906	921	180	1051	319	1406	1333	242
La	47.0	28.0	39.8	21.3	30.9	36.6	41.2	24.6
Ce	75.0	54.2	77.7	36.6	60.1	60.4	70.8	46.5
Pr	11.4	6.77	9.67	5.23	7.38	10.6	10.4	5.60
Nd	49.5	26.3	37.2	20.8	28.2	48.9	44.6	21.2
Sm	9.91	5.01	7.22	4.28	5.35	11.1	8.95	4.03
Eu	1.75	1.12	0.67	1.24	0.94	1.38	1.47	0.91
Gd	10.4	4.69	6.76	4.34	4.91	12.5	9.38	3.65
Tb	1.73	0.77	1.21	0.71	0.76	2.17	1.58	0.59
Dy	11.0	4.57	7.33	4.41	4.17	14.3	10.2	3.43
Ho	2.52	0.97	1.54	1.03	0.85	3.21	2.32	0.72
Er	7.41	2.85	4.38	2.91	2.20	9.39	6.53	2.08
Tm	1.07	0.43	0.66	0.42	0.33	1.46	0.99	0.33
Yb	6.60	2.81	4.22	2.78	2.07	8.98	6.11	2.13
Lu	0.99	0.44	0.65	0.44	0.33	1.4	0.95	0.34
Hf	3.94	7.75	5.54	3.91	5.78	2.72	6.27	3.93
Ta	0.67	0.84	1.15	0.73	1.02	0.67	1.02	0.76
Tl	1.09	0.60	1.63	1.21	0.83	1.44	1.55	0.49
Pb	5.46	18.5	12.7	3.23	13.1	5.70	5.44	9.69
Bi	0.57	0.15	0.25	0.14	0.23	0.47	0.42	0.05
Th	9.14	9.62	13.3	5.71	10.4	8.79	10.5	8.25
U	99.7	2.93	6.11	11.9	6.85	164	80.3	2.78
∑REE	236.37	138.84	199.01	106.38	148.58	222.29	215.37	116.13
LREE	194.63	121.31	172.28	89.35	132.97	168.96	177.38	102.88
HREE	41.74	17.53	26.73	17.04	15.61	53.33	37.99	13.26

续表 1

样品编号	PD1-H26	ZK7106-106	ZK7901-197	PD2-H14	ZK6401-13	ZK6401-63.3	ZK7102-8	ZK31-28
岩性	含石墨黑云母变粒岩							
LREE/HREE	4.66	6.92	6.44	5.24	8.52	3.17	4.67	7.76
δCe	0.76	0.93	0.93	0.82	0.93	0.73	0.81	0.93
δEu	0.52	0.69	0.29	0.87	0.55	0.36	0.49	0.71
$(\text{La}/\text{Yb})_N$	4.84	6.76	6.40	5.19	10.14	2.77	4.58	7.82
$(\text{Ce}/\text{Yb})_N$	2.99	5.06	4.84	3.45	7.62	1.77	3.04	5.73
La/Th	5.15	2.91	3.00	3.72	2.98	4.16	3.93	2.98

表 2 庙坪矿区石墨及大理岩样品取样位置及 $\delta^{13}\text{C}$ 值(‰)

Table 2 Sampling location and $\delta^{13}\text{C}$ (‰) value of graphite and marble samples in the Miaoping graphite deposits

样品编号	样品岩性	取样位置	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)
PD1-H23	原生石墨矿石	1号平硐1号矿体	-23.6
PD1-H28	原生石墨矿石	1号平硐1号矿体	-22.4
PD1-H29	原生石墨矿石	1号平硐1号矿体	-21.7
PD2-H14	原生石墨矿石	2号平硐3号矿体	-22.2
TC9601-H18	氧化石墨矿石	9601探槽,16.2m处	-23.0
TC9601-2	大理岩	9601探槽,2.9m处	1.7
TC9601-3	石英大理岩	9601探槽,7.8m处	-7.1
TC9601-4	大理岩	9601探槽,11.6m处	3.3
TC9601-5	大理岩	9601探槽,13.5m处	1.5
TC9601-6	石英大理岩	9601探槽,27m处	-0.4
PD1-H30	石英大理岩	1号平硐,1号矿体夹石	-5.1

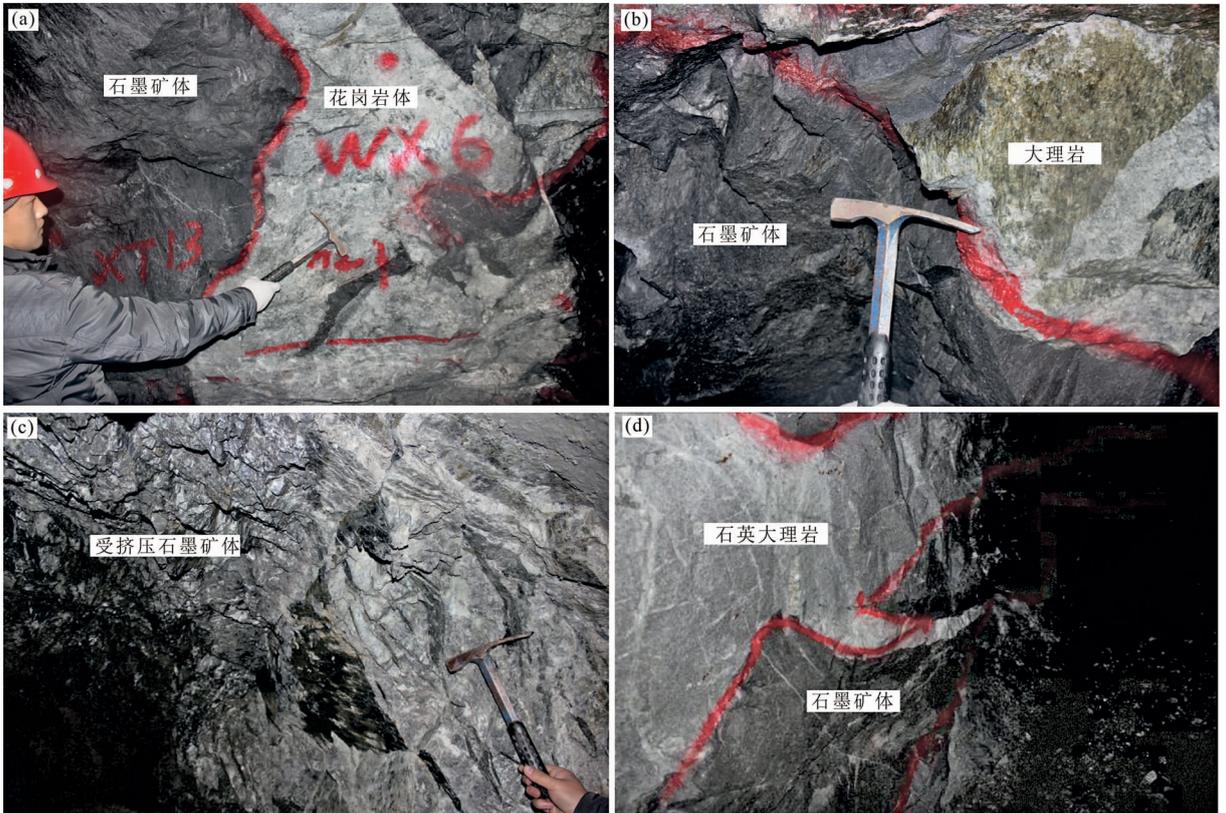


图 3 庙坪石墨矿床矿体照片

Fig. 3 Photos of ore bodies of the Miaoping graphite deposits

(a)—被岩体侵入的石墨矿体;(b)—石墨矿体中大理岩夹石;(c)—受挤压较为破碎的石墨矿化带;(d)—石墨矿体中较长的石英大理岩脉
 (a)—Graphite ore body intruded by intrusion; (b)—marble in graphite ore body; (c)—graphite mineralized zone crushed by compression;
 (d)—quartz marble vein in graphite ore body

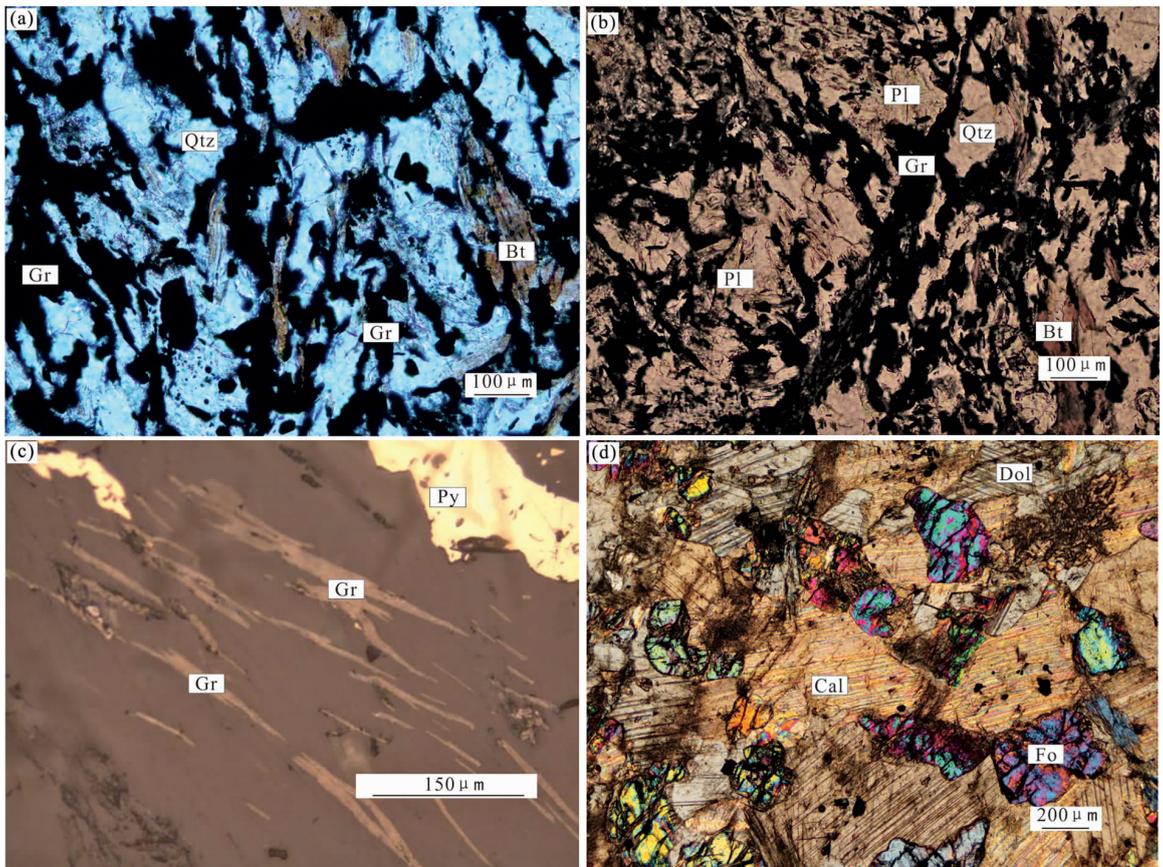


图4 庙坪石墨矿床含矿岩石及围岩显微照片

Fig. 4 Micrograph of ore bearing rock and surrounding rock of the Miaoping graphite deposits

(a, b) 含石墨黑云母变粒岩(透射光); (c) 黑云母变粒岩中石墨与黄铁矿共生(反射光); (d) 大理岩(正交偏光);

Gr—石墨; Py—黄铁矿; Qtz—石英; Pl—斜长石; Bt—黑云母; Cal—方解石; Dol—白云石; Fo—镁橄榄石

(a, b) —Biotite leptynite with graphite (transmitted light); (c) —intergrowth of graphite and pyrite in biotite granulate (reflected light); (d) —marble (crossed polars); Gr—graphite; Py—pyrite; Qtz—quartz; Pl—plagioclase; Bt—biotite; Cal—calcite; Dol—dolomite; Fo—forsterite

分布,脉体宽度多在1~5 mm。方解石是他形-半自形晶体,细粒-粗粒。硅化:分布较普遍,以细脉状或小透镜状、小团块状分布于各类岩石中,顺层或斜交于地层中,宽度多在0.001~1 mm之间,呈白色、烟灰色,主要成分为石英。

本次研究样品主要采自矿区较大规模的矿体,分布在平硐及钻孔岩芯、探槽中,样品较为新鲜。

将矿区主要的矿石样品(含石墨黑云母变粒岩)及围岩磨制光薄片,镜下观察结果表明矿石中主要的矿物种类有石墨、石英、斜长石、黑云母、黄铁矿,少量为磁铁矿、方解石、绿泥石。其中矿石矿物是石墨,其余是脉石矿物。矿石矿物中的石墨大部分呈片状或鳞片状,石墨片长径最大0.6340 mm,最小0.0017 mm,一般0.0370~0.1050 mm,为晶质鳞片型石墨矿床(图4a~c)。

镜下观察大理岩主要由方解石、白云石、镁橄榄石及黑云母等组成,方解石、白云石呈他形粒状,粒度

为0.4~1 mm,二者含量大于85%;镁橄榄石呈自形-半自形粒状,粒度为0.2~0.5 mm,含量在10%左右。黑云母及其他矿物含量在5%左右(图4d)。

4 样品分析方法

样品前处理及主微量元素、碳同位素分析测试工作中中科院地质与地球物理研究所岩矿制样与分析实验室完成,主量元素测试采用熔片法 X-射线荧光光谱法(XRF)分析,主要氧化物的分析相对误差小于2%,微量和稀土元素采用等离子质谱法(ICP-MS),分析相对误差低于5%~10%。碳同位素分析采用MAT系列稳定同位素气体质谱仪,分析误差在0.1%以内。

5 样品分析结果

5.1 主微量元素特征

用于主量、微量及稀土元素分析的含石墨黑

云母变粒岩采在平硐及钻孔岩芯、探槽,详细位置见图 2 和表 2。所有的样品均较为新鲜,含石墨黑云母变粒岩中石墨矿物未发生氧化作用。样品的岩相学特征见前述相关内容。主微量元素分析结果列于表 1。

矿区含矿岩石-黑云母变粒岩样品 SiO_2 含量变化较大,为 54.01%~77.69%,平均值为 65.37%, TiO_2 含量为 0.50%~0.80%,平均值为 0.65%, Al_2O_3 含量较高,变化于 7.32%~15.01%之间,平均值为 10.79%, TFe_2O_3 含量变化于 2.25%~8.68%之间,平均值为 4.34%;含矿岩石的 Na_2O 含量变化于 0.17%~3.38%之间,平均值为 1.74%,与砂页岩、页岩平均值比较接近,低于地壳平均 Na_2O 含量(3.48%); K_2O 含量为 1.15%~3.42%,平均值为 2.39%,高于英安岩(1.4%)及砂页岩的含量(1.3%),但与地壳的平均 K_2O 含量(2.53%)比较接近(Adachi et al., 1986)。

庙坪矿区黑云母变粒岩稀土总量较高,变化于 $116.13 \times 10^{-6} \sim 236.37 \times 10^{-6}$ 之间,平均值为 172.87×10^{-6} ,LREE/HREE 为 3.17~8.52,平均为 5.92,(La/Yb)_N 为 2.77~10.14,平均为 6.06,(Ce/Yb)_N 为 1.77~7.62,平均为 4.31,在球粒陨石标准化图解上(图 5)可以看出,黑云母变粒岩显示轻稀土分馏明显,重稀土分馏不明显,整体表现出轻稀土富集,重稀土亏损的特点。研究区黑云母变粒岩具有明显的 Eu 负异常($\delta\text{Eu}=0.36 \sim 0.87$), δEu 平均值为 0.56;Ce 表现出负异常($\delta\text{Ce}=0.73 \sim 0.93$), δCe 平均值为 0.85,说明原岩可能形成于还原沉积环境中。

在原始地幔标准化蛛网图上(图 6),庙坪矿区黑云母变粒岩显示出 U、Cs、Pb 的正异常,其中 Cs 正异常比较明显,ZK6401-63.3、PD1-H26、ZK31-28 三个样品 Pb 正异常程度较大,Sr 元素显示出明显的负异常。U 和 Pb 的正异常可能主要反映沉积岩原岩的特征,说明原岩的有机质堆积较多(Floyd et al., 1987);而 Sr 的负异常表明原岩可能来源于海相沉积物(Xia Jinsheng et al., 2019)。研究区黑云母变粒岩相对富集 Rb、Ba,Rb/Sr 在 0.27~2.75 之间,平均值为 1.12,Sr/Ba 在 0.05~1.08 之间,平均为 0.42,反映出缺氧弱还原环境(Liu Jingdang et al., 2017)。

整体来看,本区黑云母变粒岩样品微量元素蛛网图变化趋势基本一致,表明其均处于相似的沉积环境,又表现出各自的特征。

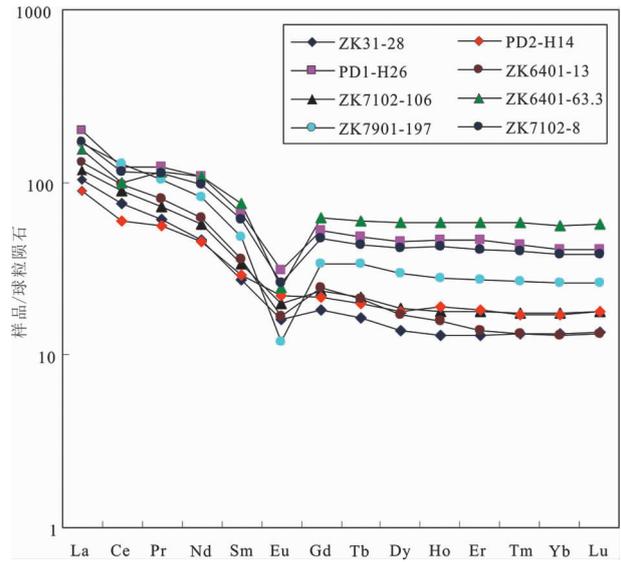


图 5 庙坪石墨矿床黑云母变粒岩稀土元素配分曲线(球粒陨石标准化值据 Sun et al., 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns diagrams for biotite granulite of the Miaoping graphite (after Sun et al., 1989)

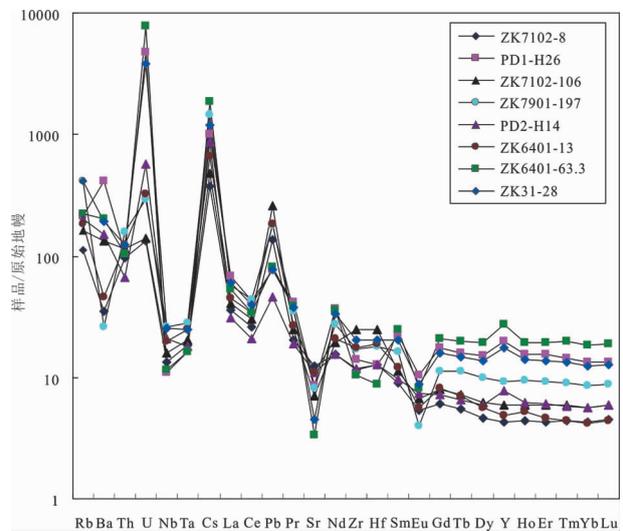


图 6 庙坪石墨矿床黑云母变粒岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(原始地幔标准化值据 Sun et al., 1989)

Fig. 6 Primitive mantle-normalized trace element spider diagrams for biotite granulite of the Miaoping graphite (after Sun et al., 1989)

5.2 碳同位素特征

庙坪石墨矿床矿石为晶质鳞片状集合体,先对石墨矿石进行石墨单矿物挑选,然后进行石墨单矿物的碳同位素分析。

本研究共测定了 11 个石墨及大理岩样品的碳同位素组成。样品采自矿区探槽及平硐,表 2 统计了样品特征、取样位置及碳同位素值。该矿床石墨的碳同位素组成特点如下:① 矿石中石墨样品的

$\delta^{13}\text{C}$ 值变化很小,5个样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布范围为 $-23.6\%\sim-21.7\%$;②大理岩样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化相对较大,6个样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布范围为 $-7.1\%\sim 3.3\%$;③原生石墨矿石与氧化石墨矿石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较接近。

6 讨论

6.1 变质原岩恢复

本次用于原岩恢复的变质岩样品8件,岩性为含石墨黑云母变粒岩,经过数据计算处理后的 $\text{Al}_2\text{O}_3-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 图解参数、尼格里特征参数列于表3。 $(\text{Al}_2\text{O}_3-\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 图解中的 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 均为分子数,运用此图分析时需将样品中的 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 重量百分数换算成分子数,然后再乘以1000。

庙坪石墨矿区的变质岩大部分表现出富Al贫Ca,且 $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$,显示了变质沉积岩的特征。在变质岩中,由于 SiO_2 的变化一般比较大,因此很少用 SiO_2 进行原岩恢复。在区分变质沉积岩与之成分近似的变质岩浆岩图解中, $\text{Al}_2\text{O}_3-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 图解的应用较为普遍(Wang Renmin et al., 1987),这是由于沉积岩和岩浆岩都能变质成为变粒岩。本区8件黑云母变粒岩样品7件投影在沉积岩区(图7a),只有1件投在了岩浆岩区,说明本区黑云母变粒岩原岩为正常的沉积岩,但有可能受到了后期岩浆的改造。

在尼格里 $[(\text{al}+\text{fm})-(\text{c}+\text{alk})]-\text{Si}$ 图解上(图7b),黑云母变粒岩样品全部落入砂质、泥质沉积岩区。总体上,庙坪矿区的变质岩原岩表现出以细碎屑沉积为主的特征。综合研究认为,庙坪矿区变质岩原岩应为沉积岩,具有泥质砂岩、粉砂岩的特征。

6.2 沉积环境及原岩物质来源分析

一般认为Fe与Mn的富集与热液关系密切,而Al的富集与陆源碎屑沉积物关系密切(Klinkhammer et al., 1993)。因此,用Al与 $(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 比值是一个比较重要沉积环境判别的标志。在沉积时, $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 会随着热水沉积的减少而不断变大,一般会在 $0.01\sim 0.60$ 之间变化,反映的沉积环境从热水环境到海洋生物成因变化(Yamamoto et al., 1987; Murray, 1994)。庙坪矿区黑云母变粒岩的 $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 比值变化从0.37到0.97,平均值为0.69,沉积环境反映了海洋沉积环境,而非热水沉积环境。

δCe 是表征样品中Ce相对于其他REE分离程

度的参数,同时 δCe 可以反映岩石形成时的氧化还原环境(Liu Qinfu et al., 1998; Yang Xinglian et al., 2008)。本区含矿岩石黑云母变粒岩 δCe 值均小于1,说明原岩主要形成于缺氧还原的沉积环境。

从元素地球化学特征看,黑云母变粒岩样品的 MgO/CaO 比值较高,显示封闭半封闭成化滞留泻湖环境。黑云母变粒岩轻重稀土比值与稀土总量负相关, δEu 值与轻重稀土比值负相关,具有负铈异常,这些特征显示原岩沉积环境属于陆源海相沉积环境,物质来源于大陆碎屑物,位于滨浅海潮汐带沉积(Liu Jingdang et al., 2017)。

6.3 碳的来源

一般认为,碳在地球上的存在形式可分为4种:①以碳质球粒陨石为代表的初始碳及以金刚石、碳酸岩岩浆代表的初生碳, $\delta^{13}\text{C} = -5\%$;②空气中的 CO_2 及与之平衡的地表或近地表水体里的 CO_2 ;③生物体内的有机碳;④沉积碳酸盐中的无机碳(Lowenstern et al., 2001);在这4种碳的存在形式中,沉积碳酸盐的无机碳和生物体的有机碳为科学家长期认同的石墨矿床的两种碳质来源,即有机成因和无机成因(Luque et al., 2012),而且这两种观点均有大量沉积学、矿物学、矿相学、同位素地球化学等学科的依据(Chen Yanjing et al., 2000)。

在地壳碳储中,沉积的有机碳大约占27%,其 $\delta^{13}\text{C}$ 的平均值为 -25% 。近代沉积物中有机物质的 $\delta^{13}\text{C}$ 的范围为 $-10\%\sim -30\%$,而沉积碳酸盐大约占73%,其 $\delta^{13}\text{C}$ 的平均值为 0% ,地幔的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -7% 左右。因此,可以根据石墨矿床中 $\delta^{13}\text{C}$ 的值来分析其碳物质来源(Lan Xinyan et al., 1981; Li Guanghui et al., 1981; Li Kaiyue et al., 2018)。

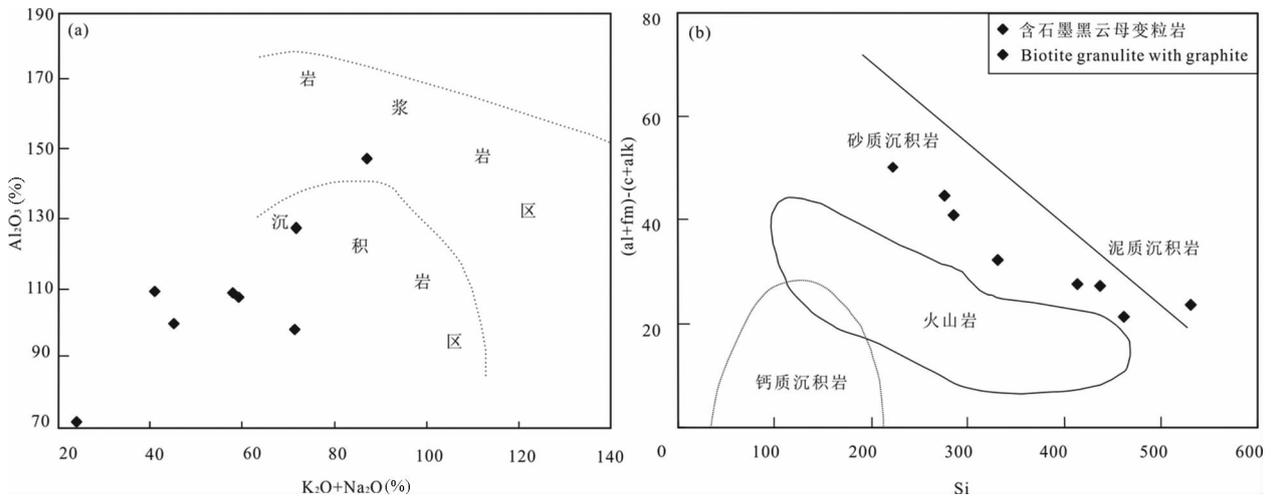
庙坪石墨矿碳同位素分析结果中,原生矿石的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-23.6\%\sim -21.7\%$,氧化矿石的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -23% 。从表2可以看出,原生矿石和氧化矿石 $\delta^{13}\text{C}$ 值非常接近,说明它们具有相同的来源,并且原生矿石被氧化时没有发生碳同位素的分馏(SatiSh-Kumaret al., 2011)。

庙坪矿区石墨中的 $\delta^{13}\text{C}$ 分析结果为 $-23.6\%\sim -21.7\%$,其结果在现代动植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 范围内(图8);而本区石墨矿体围岩大理岩 $\delta^{13}\text{C}$ 测定结果为 $-7.1\%\sim 3.3\%$,数值虽然稍有差异,且有一定的变化范围,但总体与国内各地石灰岩一致(图8)。庙坪石墨矿中矿石石墨与围岩大理岩中碳酸盐矿物碳的同位素具有明显的差别,说明庙坪矿区两者碳

表 3 庙坪矿区黑云母变粒岩图解参数计算值

Table 3 Graphic parameter calculation value of graphite samples in the Miaoping graphite deposits

图解 参数	Al ₂ O ₃ -(K ₂ O+Na ₂ O)图解		尼格里图解				
	Al ₂ O ₃	K ₂ O+Na ₂ O	al	fm	c	alk	si
THJ-PD2-H14	100.04	45.30	38.77	24.95	18.73	17.56	436.35
THJ-ZK31-28	107.40	58.03	38.68	24.87	15.54	20.9	453.25
THJ-PD1-H26	106.32	59.23	38.95	21.77	17.58	21.7	461.55
THJ-ZK6401-13	127.80	71.94	37.09	29.15	12.89	20.88	331.45
THJ-ZK6401-63.3	71.79	24.25	22	50.47	20.11	7.43	275.43
THJ-ZK7102-106	98.67	71.46	40.54	21.31	8.79	29.36	531.24
THJ-ZK7102-8	107.59	41.15	30.52	40.16	17.65	11.67	283.07
THJ-ZK7901-197	147.21	87.11	32.12	43.03	5.84	19.01	222.08

图 7 庙坪矿床黑云母变粒岩 Al₂O₃-(K₂O+Na₂O)图解(a)

(after Wang Renmin, 1987) 及 (al+fm)-(c+alk)-Si 图解(b) (after Simonen, 1953)

Fig. 7 Al₂O₃-(K₂O+Na₂O) diagram and (al+fm)-(c+alk)-Si diagram for biotite granulite in the Miaoping graphite (a—after Wang Renmin, 1987; b—after Simonen, 1953)

质来源不同,石墨中的碳质来源以有机碳为主,无机碳叠加,而大理岩的碳质来源为无机碳。

6.4 成矿机制

勉县庙坪石墨矿的含矿岩石为变粒岩类、片岩类,属低角闪岩相产物,其变质条件温度为 600~700℃,压力为 $4 \times 10^8 \sim 6 \times 10^8$ Pa,变质作用属中压相系区域变质作用(Wu Chunlin, 1994)。另外,矿区大理岩为橄榄大理岩也佐证了上述说法。通过对本区变质原岩恢复、沉积环境及原岩物质来源分析可知,矿区变质原岩应为沉积岩,具有泥质砂岩、粉砂岩的特征;变质岩系原岩主要形成于缺氧还原的海洋沉积环境。

勉略缝合带物质成分非常复杂。本区早古生代地壳扩张与破裂的差异性升降运动破坏了晋宁以来扬子板块北缘统一的古地理格局,地幔上升引起区域性拉张,导致了上部地壳的差异性升降运动。南部继承了扬子板块北缘的构造体制,北侧近东西向

陆内裂谷的快速沉降形成深水碎屑岩-硅质岩。在上述区域带状上升隆起背景下,海西期通过裂谷形式而形成勉略海槽,海槽南缘形成了坡群沉积,最终形成海西期海盆。在特定的海盆沉积环境,导致环境闭塞,底水停滞,被搬运到水体中的原始植物在积累和分解过程中,产生 H₂S、CH₄ 等气体,使水体缺氧,有利于厌氧菌的生存和繁殖,进一步使水体呈现还原环境。分解后的有机碳不易氧化成 CO₂ 气体逸出,而保存在地层中,成为富含有机质的沉积物。(Luque et al., 1998; Wang Tao, 2008; Ma Xudong et al., 2019)。在印支期的造山运动中,勉略海槽闭合,扬子板块俯冲,由于区域内发生了较强的变质作用(Zhang Guowei et al., 2004),原岩变质后形成变粒岩、片岩类岩石,而原岩中的有机碳质重新结晶形成石墨。

综上所述,庙坪石墨矿层明显受层位、岩相和岩性的控制。矿源层为富含碳质的泥质岩、碎屑岩类

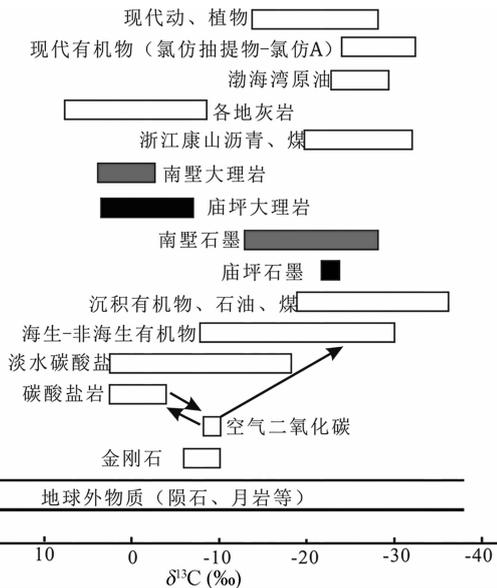


图8 庙坪石墨矿床矿石及大理岩 $\delta^{13}\text{C}$ 含量对比图
(据 Li Guanghui, 2008)

Fig. 8 Comparison diagram of $\delta^{13}\text{C}$ content of ore and marble in the Miaoping graphite deposits (after Li Guanghui, 2008)

岩石,经区域变质作用,使含碳岩石富化成矿。因此,矿床成因应属沉积变质型矿床。

7 结论

(1) 庙坪石墨矿床含矿岩石黑云母变粒岩 Al_2O_3 含量为 7.32%~15.01%、 TFeO 为 2.28%~8.68%、 Na_2O 为 0.17%~3.38%、 K_2O 为 1.15%~3.42%、 TiO_2 为 0.50%~0.80%, 稀土元素总量平均为 172.87×10^{-6} , 表现出轻稀土富集、重稀土亏损的特点。黑云母变粒岩具有明显的 Eu、Sr 负异常, U、Cs、Pb 的正异常, Ce 异常不明显。

(2) 庙坪矿区变质岩原岩应为沉积岩, 具有泥质砂岩、粉砂岩的特征, 变质岩系原岩主要形成于缺氧还原的海洋沉积环境, 物质来源以陆源碎屑物为主。

(3) 庙坪矿区矿石中石墨的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -23.6‰~-21.7‰, 大理岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -7.1‰~-3.3‰, 石墨中的碳质来源主要为生物有机质, 无机碳叠加, 大理岩的碳质来源为无机碳。由于区域发生了较强的变质作用, 原岩变质后形成变粒岩、片岩类岩石, 而原岩中的有机碳质重新结晶形成石墨矿床。

致谢: 实验过程中得到了中科院地质与地球物理研究所刘艳红、高炳宇、李文君、李洪伟老师给予的热情指导与帮助, 两位审稿专家和编辑部老师为本文提出了宝贵的修改意见和建议, 笔者在此一并深表感谢!

注释

① 陕西省核工业地质局二一四大队. 2014. 1:10000 陕西省勉县张家河乡庙坪钼金银多金属矿及石墨矿普查区域地质图.

References

- Adachi M, Yamamoto K, Sugisaki R. 1986. Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the northern Pacific, their geological significance as indication of ocean ridge activity. *Sedimentary Geology*, 47: 125~148.
- Bai Wenlong, Wang Dong, Zhai Wenjuan. 2019. Geological characteristics and prospect analysis of the Qingqiaohe graphite deposit in Liuba County of Shaanxi Province. *Mineral Exploration*, 10 (2): 210~216 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yanjing, Liu Congqing, Chen Huayong, Zhang Zengjie, Li Chao. 2000. Carbon isotope geochemistry of graphite deposits and ore-bearing khondalite series in North China: Implications for several geoscientific problems. *Acta Petrologica Sinica*, 16 (2): 233~244 (in Chinese with English abstract).
- Floyd P A, Leveridge B E. 1987. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones. *Journal of the Geological Society of London*, 144: 531~542.
- Fu Lipu, Li Yuexi, Song Lisheng. 1983. The Silurian of West Qinling Mountains. *Journal of Stratigraphy*, 7(4): 258~271 (in Chinese with English abstract).
- Klinkhammer G, Elderfield H, Hudson A. 1993. Rare earth elements in seawater hydrothermal vents. *Nature*, 305(5931): 185~188.
- Lan Xinyan. 1981. Study on genesis of the Nanshu graphite deposit and on feature of Precambrian graphite-bearing rock association, Shandong. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, (3): 30~42 (in Chinese with English abstract).
- Li Fangzhou, Chen Weihua, Wu Junping, Du Jianhua. 2017. Graphite ore resources and ore prospecting in Shaanxi Province. *Geology of Shaanxi*, 35(1): 1~7 (in Chinese with English abstract).
- Li Guanghui, Huang Yongwei, Wu Runtang. 2008. Origin of carbon and concentration of uranium and vanadium from Liuniao graphite formation in Jixi. *Global Geology*, 27(1): 19~22 (in Chinese with English abstract).
- Li Kaiyue, Chen Yanjing, Yu Zhenbing, Tang Haoshu, Chen Weiye. 2018. Carbon isotope compositions and geochemical characteristics of the Zhangshe graphite deposit of the Jingshan Group, Jiaobei. *Earthscience Frontiers*, 25(5): 19~33 (in Chinese with English abstract).
- Li Mingchang. 1992. Geological characteristics and development application of the Tiede graphite-sillimanite deposit in Yang county, Shaanxi Province. *Shaanxi Geological Science and Technology Information*, 17(3): 29~32 (in Chinese with English abstract).
- Liu Qinfu, Yang Xiaojie, Ding Shuli. 1998. Geochemistry of trace elements and REE on kaolinite rocks in Late Palaeozoic coalmeasures, north China. *Geochimica*, 27(2): 196~203 (in Chinese with English abstract).
- Lowenstern J B. 2001. Carbon dioxide in magmas and implications for hydrothermalsystems. *Mineral. Deposita*, 36: 490~502.
- Luque F J, Crespo-Feo E, Barrenechea J F, Ortega L. 2012. Carbon isotopes of graphite: implications on fluid history. *Geoscience Frontiers*, 3(2): 197~207.
- Luque F J, Pasteris J D, Wopenka B, Rodas M, Barrenechea J F. 1998. Natural fluid-deposited graphite: Mineralogical characteristics and mechanisms of formation. *American Journal of Science*, 298: 471~498.
- Ma Xudong, Zhong Yan, Chen Yali, Qu Xiaoming. 2019. Sedimentary process controls on the graphite mineralized in

- theKondalite series, western North China Craton. *Geotectonica Et Eetallogenia*, 43(06): 1155~1168(in Chinese with English abstract).
- Murray R W. 1994. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: general principles and application. *Sedimentary Geology*, 90: 213~232.
- Satish-Kumar M, Jaszczak J A, Hamamatsu T, Wada H. 2011. Relationship between structure, morphology, and carbon isotopic composition of graphite in marbles: Implications for calcite-graphite carbon isotopethermometry. *American Mineralogist*, 96:470~485.
- Simonen A. 1953. Stratigraphy and sedimentation of the Svecofenmic, early Archean supracrustal racks in southwestern Finland. *Sull. Comm. Geol. Finland*, 160: 1~64.
- Sun S S, Mc Donough W. 1989. Chemical and isotopic systematic ofOceanic basalts; implication for mantle compositions and processes. In: Saunders AD and Norry MJ. *Magmatism in Oceanic Basins*, London: Geol. Soc. Spec. Pub., 42: 313~345.
- Sun Weidong, Li Shuguang, Ya Dongchen, Li Yujing. 2000. Zircon U-Pb dating of granitoids from South Qinling, Central China and their geological significance. *Geochimica*, 29(3): 209~216 (in Chinese with English abstract).
- Tang Hejun, Zhang Baolin, Ye Rong, Zhang Guoliang, Zhang Wenbin. 2015. Geological characteristics and genesis of the Miaoping graphite deposit in Mian County of Shaanxi Province. *Geology and Exploration*, 51(3): 534~544 (in Chinese with English abstract).
- Tu Huaikui. 2005. Comparity of the Ningshan and the Hannan rock body characteristics and mineral resource and exploitation in Shaanxi. *Geology of Chemical Minerals*, 27(4): 211~225 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tao. 2008. Tectonic lithological assemblages of Southern Qinling accretionary complex and the formation proecess. Beijing, Institute of Geology, Chinese Academy Of Geological Sciences, 1~117(in Chinese with English abstract).
- Wang Zongqi, Yan Quanren, Yan Zhen, Wang Tao, Jiang Chunfa, Gao Lianda, Li Qiugen, Chen Juanlu, Zhang Yingli, Liu Ping. 2009. New division of the main tectonic units of the Qinling orogenic belt, Central China. *Acta Geologica Sinica*, 83(11): 1527~1546(in Chinese with English abstract).
- Wu Chunlin, Yu Tingyao. 1994. Geological charactecers of the Heigou graphite deposit, Henren County. *Building Matererals Geology*, 4: 25~27(in Chinese with English abstract).
- Xia Jinsheng, Sun Li, Xiao Keyan, Wang Junzhu, Chen Xian, Cui Ning. 2019. Geochemical features and genesis analysis of the Zhongba scaly graphite deposit in Sichuan Province. *Geoscience*, 33(06): 1286~1294 (in Chinese with English abstract).
- Yamamoto K. 1987. Geochemical characteristics and depositional environments of chert and associated rocks in Rona P the Franciscan and Shimanto Terranes. *Sedimentary Geology*, 52: 65~108.
- Yang Xinglian, Zhu Maoyan, Zhao Yuanlong, Zhang Junming, Guo Qingjun, Pi Daohui. 2008. REE geochemical characteristics of the Ediacaran-Lower Cambrian black rock series in Eastern Guizhou. *Geological Review*, 54(1): 3~15 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chengli, Zhang Guowei, Yan Yunxiang, Wang Yu. 2005. Origin and dynamic significance of Guangtoushan granite plutons to the north of Mianlue zone in Southern Qinling. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 711~720(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Cheng Shunyou, Guo Anlin, Dong Yunpeng, Lai Shaocong, Yao Anping. 2004. Mainlue paleo-suture on the southern margin of the Central Orogenic system in Qinling-Daibie with a discussion of the assembly of the main part of the continent of China. *Geological Bulletin of China*, 23(9,10):846~853(in Chinese with English abstract).
- Zhao Fulai. 2015. Geology and metallogenesis of the Da'angou block in Tiche graphite mine of Yangxian County. *Geology of Shannxi*, 32(02): 31~35(in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 白文龙, 王东, 翟文娟. 2019. 陕西省青桥河石墨矿地质特征及找矿前景分析. *矿产勘查*, 10(02): 210~216.
- 陈衍景, 刘丛强, 陈华勇. 2000. 中国北方石墨矿床及赋矿孔达岩系碳同位素特征及有关问题讨论. *岩石学报*, 16(2): 233~244.
- 傅力浦, 李跃西, 宋礼生. 1983. 西秦岭的志留系. *地层学杂志*, 7(04): 258~271.
- 兰心俨. 1981. 山东南墅前寒武纪含石墨建造的特征及石墨矿床的成因研究. *长春地质学院学报*, (03): 30~42.
- 李方周, 陈炜华, 吴军平, 杜建华. 2017. 陕西省石墨矿资源特点及找矿方向. *陕西地质*, 35(01): 1~7.
- 李光辉, 黄永卫, 吴润堂. 2008. 鸡西柳木石墨矿碳质来源及铀、钒的富集机制. *世界地质*, 27(01): 19~22.
- 李明昌. 1992. 陕西省洋县铁河金红石晶质石墨砂线石复合型矿床特征及开发应用前景. *陕西地质科学情报*, 17(3): 29~32.
- 李凯月, 陈衍景, 余振兵, 汤好书, 陈威宇. 2018. 胶北荆山群张舍石墨矿碳同位素特征及其地质意义. *地学前缘*, 25(05): 19~33.
- 刘敬党, 肖荣阁, 张艳飞, 梁帅, 赵青, 白凤军, 张永兴, 王继春, 杨培奇, 刘剑. 2017. 华北显晶质石墨矿床. 北京: 科学出版社, 291~688.
- 刘钦甫, 杨晓杰, 丁述理. 1998. 华北晚古生代煤系高岭岩微量元素和稀土元素地球化学研究. *地球化学*, 27(2): 196~203.
- 马旭东, 钟焱, 陈雅丽, 曲晓明. 2019. 华北克拉通孔兹岩带内孔兹岩系沉积过程对石墨矿床成矿的控制. *大地构造与成矿学*, 43(06): 1155~1168.
- 孙卫东, 李曙光, 陈亚东. 2000. 南秦岭花岗岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义. *地球化学*, 29(3): 209~216.
- 汤贺军, 张宝林, 叶荣, 张国梁, 张文斌. 2015. 陕西勉县庙坪石墨矿床地质特征与成因初步探讨. *地质与勘探*, 51(03): 534~544.
- 涂怀奎. 1995. 汉中地区主要建材非金属矿床特征. *建材地质*, (02): 15~19.
- 王仁礼, 贺高品. 1987. 变质岩原岩图解判别法. 北京: 地质出版社, 1~199.
- 王涛. 2008. 南秦岭增生杂岩带构造岩石组合及其形成过程. 北京, 中国地质科学院, 1~117.
- 王宗起, 闫全人, 闫臻, 王涛, 姜春发, 高联达, 李秋根, 陈隽璐, 张英利, 刘平. 2009. 秦岭造山带主要大地构造单元的新划分. *地质学报*, 83(11): 1527~1546.
- 吴春林, 曲廷耀. 1994. 桓仁县黑沟石墨矿床地质特征及成因研究. *建材地质*, (04): 25~27.
- 夏锦胜, 孙莉, 肖克炎, 汪君珠, 陈贤, 崔宁. 2019. 四川省中坝晶质石墨矿床地球化学特征及成因分析. *现代地质*, 33(06): 1286~1294.
- 杨兴莲, 朱茂炎, 赵元龙. 2008. 黔东南震旦系-下寒武统黑色岩系稀土元素地球化学特征. *地质论评*, 54(1): 3~15.
- 张国伟, 程顺有, 郭安林, 董云鹏, 赖绍聪, 姚安平. 2004. 秦岭-大别中央造山系南缘勉略古缝合带的再认识. *地质通报*, 23(9, 10): 846~853.
- 张成立, 张国伟, 晏云翔, 王煜. 2005. 南秦岭勉略带北光头山花岗岩体群的成因及其构造意义. *岩石学报*, 21(3): 711~720.
- 赵福来. 2014. 洋县铁河石墨矿区大安沟矿段成矿地质特征及成矿浅析. *陕西地质*, 32(02): 31~35.

Geochemical characteristics and genetic mechanism of the Miaoping graphite deposit in the Mianxian County of Shaanxi Province

TANG Hejun^{1,2)}, ZHANG Baolin^{*3)}, WU Zhenhan^{1,2)}, MENG Guixiang^{1,2)},
ZHANG Guoliang³⁾, ZHANG Wenbin⁴⁾

1) *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

2) *China Deep Exploration Center, China Geological Survey & Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

3) *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*

4) *No. 214 Team, Shaanxi Nuclear Industry Geological Bureau, Hanzhong, Shaanxi 723200, China*

** Corresponding author: blzhang@mail.iggcas.ac.cn*

Abstract

The newly discovered graphite ore deposit in the Miaoping Mianxian County is located in the southern Qinling Mian-Lüe suture zone. The industrial type is crystalline flake graphite ore. This paper systematically analyzes the geochemical characteristics of samples and discusses the metallogenic conditions and genesis of the graphite ore deposit. The results show that the content of Al_2O_3 (7.32%~15.01%), TFeO (2.28%~8.68%), Na_2O (0.17%~3.38%), K_2O (1.15%~3.42%) and TiO_2 (0.50%~0.80%) in biotite granulite are relatively high. The ΣREE of biotite-granulite is $106.38 \times 10^{-6} \sim 236.37 \times 10^{-6}$. δEu and Sr of biotite granulite show the negative anomaly, U , Cs , Pb show positive anomaly, but δCe anomaly is not obvious. The protolith of metamorphic rock in the mining area should be sedimentary rock with the characteristics of argillaceous sandstone and siltstone, which was mainly formed in the marine sedimentary environment of anoxic reduction. C isotope analysis shows that the $\delta^{13}\text{C}$ of graphite in ore is $-23.6\text{‰} \sim -21.7\text{‰}$, and that of marble is $-7.1\text{‰} \sim 3.3\text{‰}$ indicating that the graphite carbon is derived from biological organic matter, and carbon of marble from inorganic carbonate mass. Regional metamorphism helped to transform the rocks to ore zones. The genetic type of the deposit belongs to sedimentary metamorphic deposits.

Key words: Miaoping in Mianxian County; graphite deposit; geological characteristics; C isotope; genetic mechanism