

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2021.02.020

华北克拉通北缘乌兰地区石墨矿地质特征 及成因分析

李沅柏¹, 杨欣杰^{1,*}, 汪艳芸¹, 王磊², 李树才¹

(1. 自然资源实物地质资料中心, 河北 廊坊 065201, 2. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局
第七地质大队, 新疆 乌苏 833000)

摘要: 为了解华北克拉通北缘乌兰晶质石墨矿成矿条件及成因类型, 在详细野外地质调查的基础上, 利用¹³C同位素分析、差热分析等手段进行测定。石墨 $\delta^{13}\text{C}$ 含量平均为 -27.17‰ , 略高于世界各地不同时代有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值(-26‰)。石墨最大放热峰值为 $726\sim 1\,030\text{℃}$, 主要分布于 $900\sim 1\,030\text{℃}$, 证实石墨矿区域变质程度达角闪岩相和麻粒岩相; 碳质来源于同源生物有机质, 结合矿床地质特征及矿物组合特征, 判断石墨矿的含矿建造为一套典型的高温变质富铝沉积岩组合; 含有机质沉积物经区域变质作用, 有机质被分解重结晶形成石墨矿源层; 华力西期侵入体提供热源促使石墨片度增大, 后期遭受韧性剪切造成石墨富集而成矿。

关键词: 晶质石墨矿; 地质特征; 矿床成因; 有机碳; 内蒙古乌兰

中图分类号: P611.3; P619.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2021)02-0227-12

Discussion on Genetic Types and Prospecting Markers of Graphite Deposits in Ulan Area of Inner Mongolia

LI Yuanbai¹, YANG Xinjie^{1,*}, WANG Yanyun¹, WANG Lei², LI Shucal¹

(1. Cores and Samples Centre of Natural Resources, Langfang 065201, Hebei, China; 2. Seventh Geological
Brigade of the Geological and Mineral Exploration and Development Bureau of Xinjiang Uygur
Autonomous Region, Wusu 833000 Xinjiang, China)

Abstract: On the basis of field investigation, this paper used ¹³C isotope analysis and differential thermal analysis to determine the metallogenic conditions and genetic types of Wulan crystalline graphite ore in the northern margin of Craton in North China. The average content of graphene ¹³C is -27.17‰ , slightly higher than that of the organic matter ¹³C (-26‰). The maximum exothermal peak of graphite is $726-1\,030\text{℃}$, mainly between $900-1\,030\text{℃}$, showing that the metamorphism of the graphite ore was amphibolite facies and granulite facies. The carbon was from homologous biological organic matter. The characteristic of the deposit and that of mineral combinations deduced that the mineral-bearing structure of graphite ore was a set of typical high-

收稿日期: 2020-08-18; 修回日期: 2020-11-21

基金项目: 中国地质调查局项目“实物地质资料汇集与服务”(DD20190411)、“东天山昌吉—双沟山地区区域地质调查”(自然资源实物地质资料中心)(DD20190066)。

作者简介: 李沅柏(1987-), 男, 工程师, 主要从事地质矿产调查工作。E-mail: 191504051@qq.com。

* 通讯作者: 杨欣杰(1985-), 男, 高级工程师, 主要从事地质矿产调查工作。E-mail: yangxinjie0315@163.com。

temperature metamorphic aluminium-rich sedimentary rocks. The organic deposits were decomposed and recrystallized by regional metamorphism, forming graphite source beds. The heat source provided by the Hualixi intrusive body increased the flake of the graphite, thus graphite ore enriched and formed at later stage because of ductile shear.

Keywords: crystalline graphite ore; geological characteristics; deposit genesis; organic carbon; Wulan area of Inner Mongolia

当今世界石墨矿产异军突起,发展迅猛,它是一种特殊的非金属材料,兼有金属的优良性能,具有耐高温性、化学稳定性、导电导热性等特征,广泛应用于电气、钢铁、原子能及国防工业等方面(BAI Q, et al., 2015)。石墨被开发利用的领域不断扩大,新的用途将会越来越广,石墨矿床地质特征、成因类型、分布规律以及成矿远景是中国矿产资源研究的重要问题之一。石墨是中国的优势矿产,特别是在战略性新兴产业中具有不可替代的重要作用,对石墨成因类型及找矿标志探讨具有显著的地质意义及国民经济意义(姜高珍等, 2017)。

石墨矿床成因划分为区域变质型、接触变质型和岩浆热液型石墨矿床。区域变质型石墨矿床的原岩建造为含碳质黏土岩-中基性火山岩-碳酸盐岩建造(兰心俨, 1981; 李寒滨等, 2014); 接触变质型石墨矿床和岩浆热液型石墨矿床都是由含碳或含煤地层的有机质受到岩浆烘烤发生变质形成。区域变质型石墨矿床多形成于古老克拉通具有较高热流值的深变质岩中(李超等 2015), 有机质经脱氧、脱氢反应结晶成鳞片状石墨, 变质程度从低温片岩相到高温麻粒岩相均有(柴静等, 1992; 张清平等, 2011); 接触变质型石墨矿床多形成于活动大陆边缘侵入体外围(李超等 2015), 炙热岩浆烘烤地层中的有机质而使其变成石墨, 以新疆苏吉泉为代表的岩浆热液型石墨矿床, 含碳围岩被岩体侵入同化, 在岩浆沸腾翻滚条件下形成球状石墨矿石(张国新等, 1996)。

乌兰一带石墨矿是地质矿产调查评价发现的晶质石墨矿, 产于太古界乌拉山岩群中, 矿床成因机制与典型的区域变质型石墨矿和典型接触热变质型石墨矿均有区别, 研究程度较低, 围绕该矿床地质特征及矿床成因进行了较系统调研, 利用多种手段对石墨矿碳质来源进行总结分析, 对成矿机制进行初步探索, 对在周围相似成矿背景下找到相似的矿床具有一定的指导意义。

1 区域地质概况

华北克拉通北缘是华北克拉通北部与中亚造山带东段 2 个构造单元的接触部位(陈毓川等 2003), 华北克拉通是全球古老克拉通之一, 保存较好, 矿产资源丰富(LIU D Y, et al., 1992; ZHAI M G, et al., 2005; 翟明国, 2010), 主要由太古代-古元古代变质基底和中新元古代-显生宙沉积盖层组成(张瑞英等, 2013), 新太古代晚期华北微陆块拼合, 形成大量的 TTC 片麻岩和壳熔花岗岩, 并发生角闪岩相-麻粒岩相区域变质作用, 最后沉积盖层形成标志克拉通化(翟明国, 2011)。华北克拉通古元古代发生碰撞、造山和岩浆事件, 中元古代形成地台演化(赵宗溥, 1993; 翟明国, 2006; 郭云鹏, 2017)。根据华北克拉通前寒武结晶基底划分为东部陆块、西部陆块和中部造山带(李旭平等, 2019)。研究区位于华北克拉通北缘西部板块的阴山地块(图 1), 狼山-白云鄂博裂谷带的西端(肖伟等, 2012), 武川-固阳一大余太东西向韧性剪切带北侧(孙德育等, 1990)。

区内出露地层主要有: 乌拉山岩群为华北地台变质结晶基底, 为一套由各种片麻岩、片岩、变粒岩夹大理岩组成的中深变质岩系, 含石墨矿, 原岩为富铝的高黏土质砂岩、含有机质黏土岩、碳酸盐岩及中基性-中酸性火山岩(邵积东等); 盖层由中元古界白云鄂博群沉积岩组成, 为一套浅变质浅海相细碎屑岩-碳酸盐沉积序列, 白云鄂博群主要出露哈拉都拉组 and 尖山组, 其后被中生界侏罗系中下统石拐群、白垩系二连组、新生界第三系及第四系覆盖。

受到白云鄂博-渣尔太裂谷系构造演化制约, 区内经历“拉张-断陷-挤压-褶皱”的构造演化过程, 广泛发育加里东期和华力西西期花岗岩类侵入体, 主要岩性为花岗闪长岩、二长花岗岩、黑云母花岗岩等(曹毅等, 2014; 彭润民等, 2007; 翟明国等, 2014; 姜高珍等, 2017)。

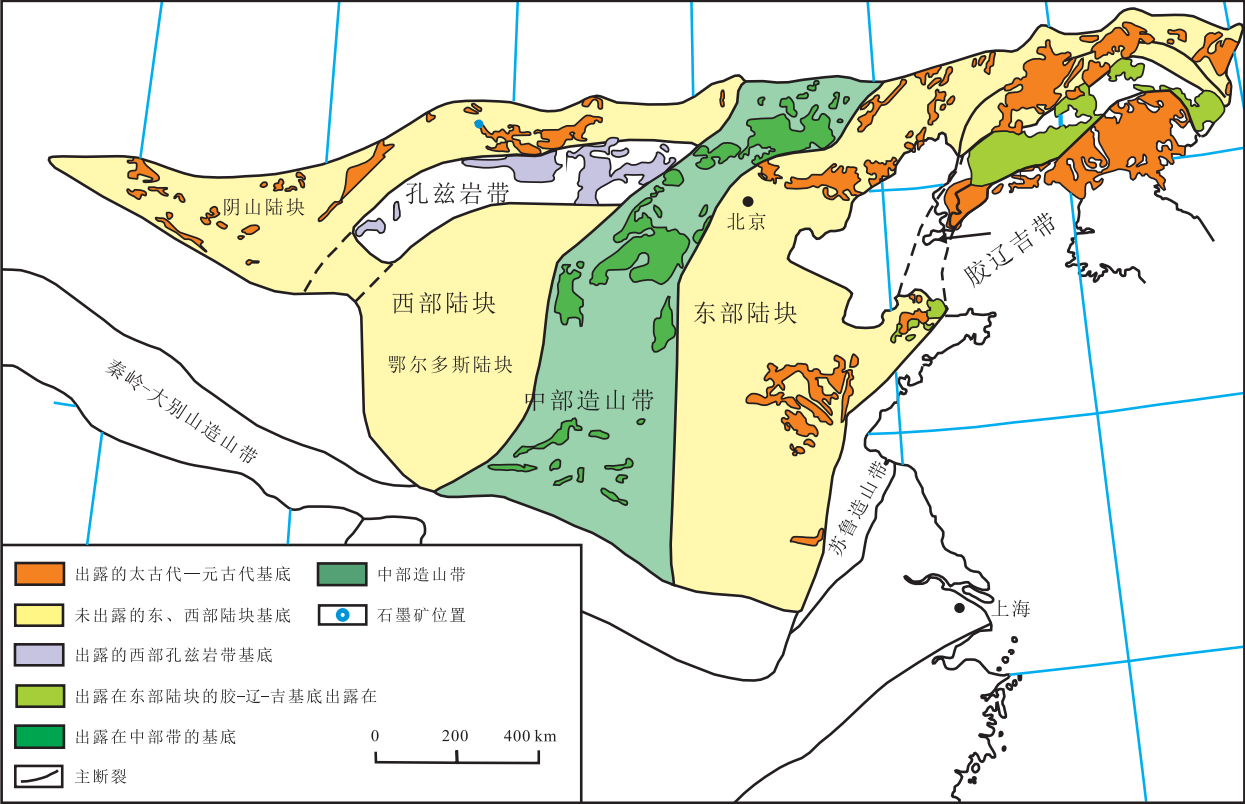


图 1 研究区位置图(据李旭平等,2019)

Fig. 1 Location of the research area

区域岩石经历 4 期变形作用。四堡期东西向变形带主要发育片麻理化构造和宽缓褶皱曲;华力西期北西向变形带主要形成宽缓褶曲和韧性剪切带,与成矿关系紧密,走向 270~280°,长 20~30 km,宽 0.5~1 km;印支期以前的地质体均遭受强烈韧性剪切变形;印支晚期北东向变形带形成紧闭褶皱和韧性剪切变形带,走向 75°,宽度约为 1 km;印支晚期东西向变形带形成紧闭褶皱和韧性剪切变形带,宽度约为 1~1.5 km(国土资源实物地质资料中心,2011)。

2 矿区地质概况

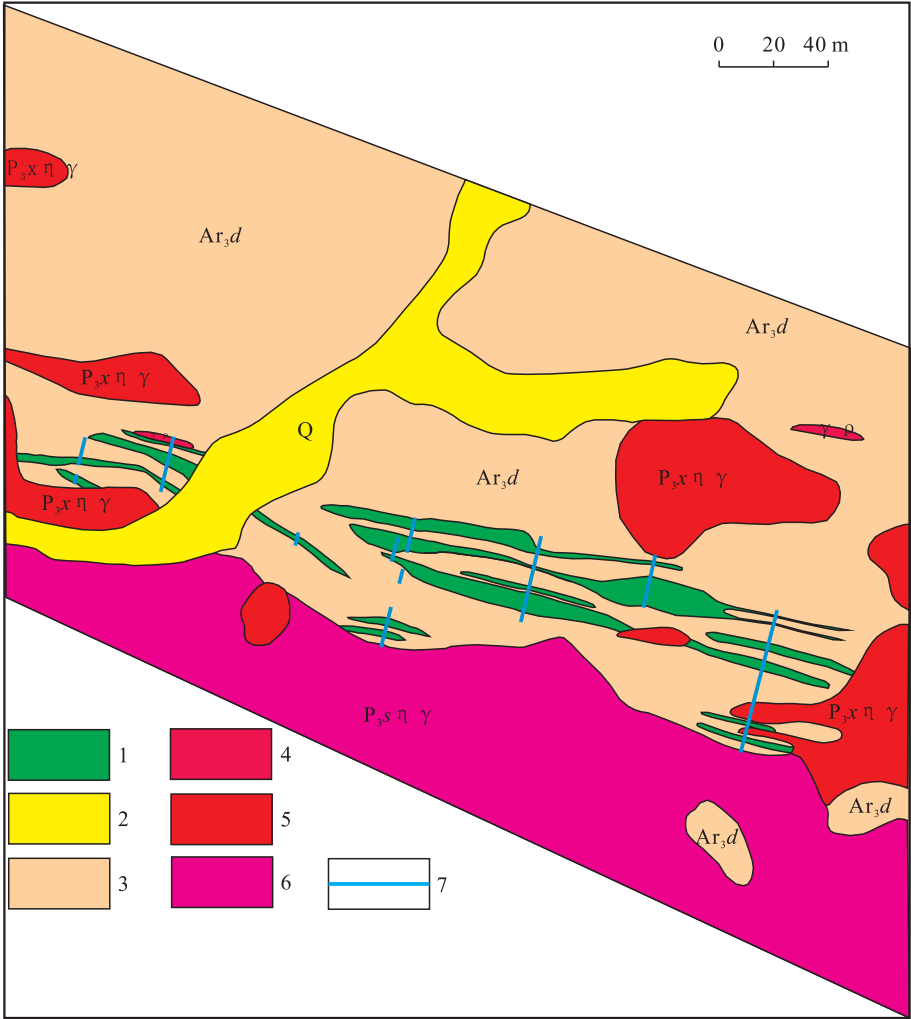
矿区出露地层主要为晚太古代乌拉山岩群和全新统冲洪积物,岩浆岩为华力西期的酸性侵入岩(图 2)。

乌拉山岩群是一套富铝中深变质岩系,为石墨矿的赋矿地层,岩性主要是黑云斜长片麻岩、二云母斜长片麻岩、黑云石英片岩、强硅化石墨钾长变粒岩、含石墨石榴黑云石英片岩、石墨矽线石白云母片

岩、石墨红柱石方解石英片岩、含电气石石墨矽线石二云母片岩及石墨钾长石英片岩等,局部夹有磁铁角闪岩、透闪石角闪岩;岩石普遍经历了深层次韧性剪切变形和后期脆性变形叠加改造,赋矿岩石可达糜棱片岩、千糜岩,变质矿物含矽线石、红柱石、石榴子石等富铝矿物(图 3),出现高温变质矿物钾长石,说明乌拉山群为一套高温变质富铝沉积岩组合含矿建造。

区内岩石经历了四堡期和华力西期变形作用。四堡期变形使岩石片理化,石墨呈层状或似层状,华力西期变形造成乌拉山岩群劈理置换强烈,石英塑性拉长形成拉伸线理和形式多样的“A”型小褶皱,褶皱轴面(S)与岩性假层理(S₀)基本一致,小型揉皱显示南北向压应力场,伴有明显右行滑动特征(图 4),使石墨富集成层、似层状或透镜状。

区内岩浆岩沿中太古代乌拉山岩群分段界面 290°方向呈带状展布,岩性主要为华力西期中细粒二长花岗岩、似斑状黑云二长花岗岩,为石墨矿化提供热动力来源。



1. 石墨矿体; 2. 第四系; 3. 乌拉山群; 4. 花岗伟晶岩; 5. 细粒二长花岗岩; 6. 似斑状黑云母二长花岗岩; 7. 探槽

图 2 矿区局部地质简图

Fig. 2 Local geological map of mining area

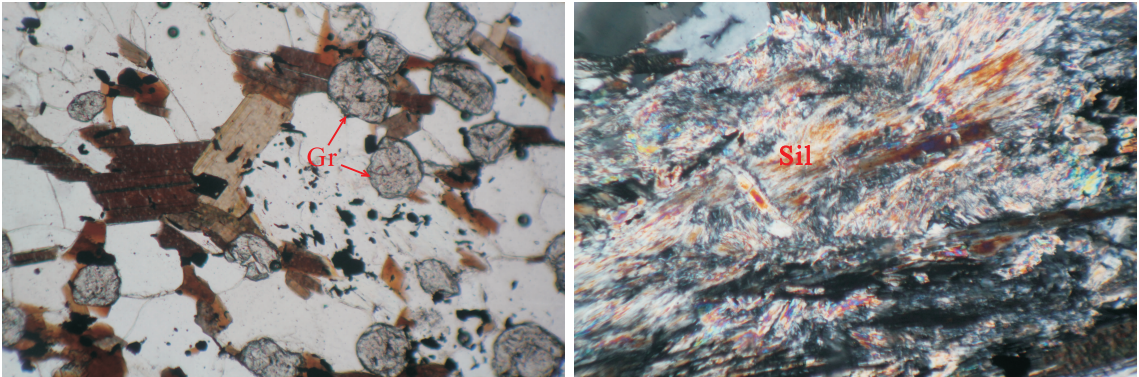
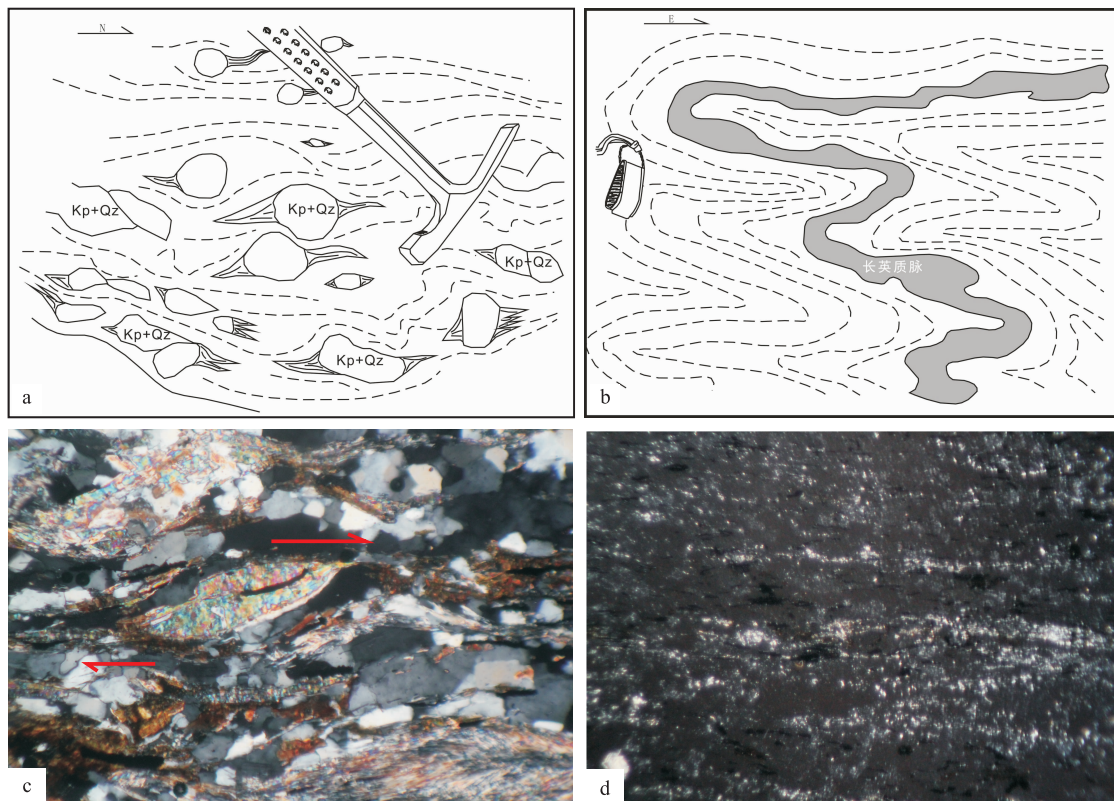


图 3 乌拉山群变质矿物图

Fig. 3 Metamorphic minerals found in Wulashan group



a. 眼球状构造; b. 小型褶皱 c. 右行剪切 d. 千糜岩

图4 乌拉山群构造变形图

Fig. 4 Structural deformation of Wulashan group

3 矿床地质特征

3.1 矿体地质特征

在区内石墨矿体中共发现石墨矿体60条,长度多数为100~500 m,少数为800~1 200 m,厚度最窄为2 m,最宽可达56 m,一般为2.5~20 m。其中,Ⅰ-17、Ⅱ-23、Ⅱ-24号矿体长度大于500 m,呈似层状,矿体走向北西—东西向,规模较大,矿体产状与糜棱面理一致,厚度一般向两端变薄至消失,赋矿围岩为石英片岩、变粒岩、云母片岩、石英岩、片麻岩等,分述如下。

(1) Ⅰ-17号石墨矿体。矿体呈似层状,矿体长度为1 208 m,真厚度为4.09~24.47 m,平均真厚度为12.61 m,厚度变化系数 V_m 为69%,属较稳定,矿石固定碳品位 $FC.d$ 为2.69%~6.33%,平均 $FC.d$ 为3.59%,品位变化系数 V_c 为33%,品位变化稳定,赋矿围岩为石英片岩及变粒岩,矿体产状为 $17^\circ \angle 44^\circ \sim 65^\circ$ 。

(2) Ⅱ-23号石墨矿体。矿体呈似层状,矿体长度为1 097 m,真厚度为2.43~11.74 m,平均真厚度为6.53 m,厚度变化系数 V_m 为55%,属较稳定,矿石固定碳品位 $FC.d$ 为3.20%~3.85%,平均 $FC.d$ 为3.54%,品位变化系数 V_c 为13%,品位变化稳定,赋矿围岩为石英片岩、变粒岩。矿体产状为 $11^\circ \angle 30^\circ \sim 60^\circ$ 。

(3) Ⅱ-24号石墨矿体。矿体呈似层状,矿体长度为899 m,真厚度为1.48~9.41 m,平均真厚度为5.24 m,厚度变化系数 V_m 为81%,属不稳定,矿石固定碳品位 $FC.d$ 为3.07%~5.95%,平均 $FC.d$ 为5.14%,品位变化系数 V_c 为23%,品位变化稳定,赋矿围岩为石英片岩、变粒岩,矿体产状为 $11^\circ \angle 45^\circ \sim 50^\circ$ 。

3.2 矿石结构、构造

矿石主要为片岩和变粒岩(图5),一般呈鳞片状变晶结构、鳞片粒状变晶结构及粒状变晶结构,矿石构造为片状构造、片麻状构造及条带状构造等;石墨呈银灰色,鳞片状,含量一般为3%~15%,鳞片

大小多为 1~5 mm 的单晶或聚晶,矿物普遍具有定向性,岩浆侵入因重结晶作用,石墨粒度进一步变

粗;脉石矿物主要为石英、钾长石、斜长石、黑云母、白云母、红柱石、方解石、矽线石、石榴子石等。

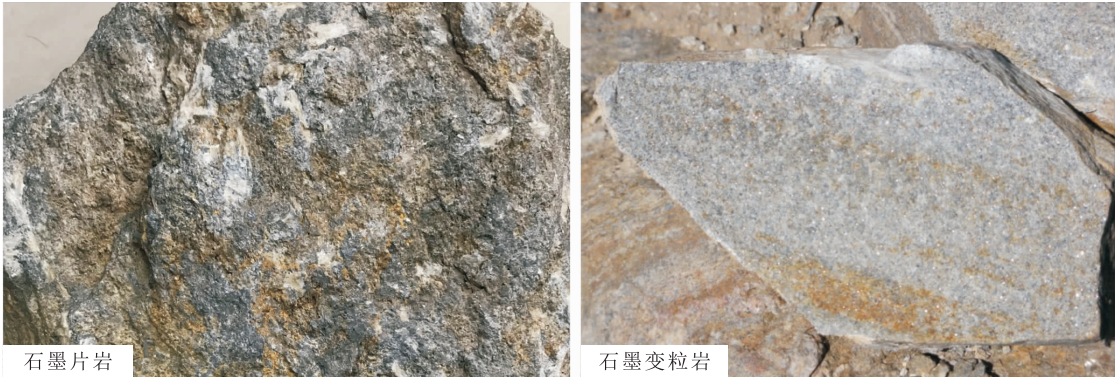


图 5 石墨矿石类型图
Fig. 5 Type of graphite deposit

4 讨论

4.1 石墨矿碳质来源

石墨矿的碳质来源主要包括原始生物有机质、碳酸盐岩围岩与幔源岩浆等,而碳同位素记录可以很好的示踪石墨的碳质来源,揭示石墨矿成因类型。因此,可根据稳定碳同位素比值 $\delta^{13}\text{C}$ 进行区分(Sanyal P, et al. , 2009; Luo G, et al. , 2014; Mizutanis, et al. , 2015;陈衍景等, 2002;莫如爵, 1989),以美国南卡罗来纳州白垩纪 *PeeDee* 箭石化石(PDB)为基准,普通石灰岩、大理岩等碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $0\pm 2\text{‰}$;幔源

成分 $\delta^{13}\text{C}$ 约为 -7‰ ;生物有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 范围在为 $-40\text{‰}\sim -6\text{‰}$,均值约为 -25‰ (Luque F J, et al. , 2012; Santosh M, et al. , 2003)。据此,笔者根据 6 件有机碳同位素测定结果得知(表 1),乌兰石墨矿的 $\delta^{13}\text{C}$ 含量为 $-24.123\text{‰}\sim -28.602\text{‰}$,平均为 -27.17‰ ,数据集中,偏差较小, $\delta^{13}\text{C}$ 值接近于中国黑龙江鸡西柳毛、山东南墅、浙江康山煤矿的测定结果(兰心俨等, 1981;李光辉等, 2008),与各地灰岩、大理岩、碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异巨大(图 6),略高于世界各地不同时代有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值(-26‰),显示其主要来自生物遗体。由此可推断乌兰石墨矿的碳质来源为地层中同源沉积的生物有机碳。

表 1 内蒙古乌兰石墨矿及有关地区 $\delta^{13}\text{C}$ 组成对比表
Tab. 1 Comparison of $\delta^{13}\text{C}$ composition in graphite deposit of Wulan Inner Mongolia and related areas

序号	研究区	岩性	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	序号	研究区	岩性	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$
1	乌兰石墨矿	石墨片岩	-24.1	13	鸡西柳毛	大理岩	-1.8
2	乌兰石墨矿	石墨片岩	-28.5	14	鸡西柳毛	大理岩	3.0
3	乌兰石墨矿	石墨片岩	-28.6	15	南墅石墨矿	花斑状石墨矿	-24.8
4	乌兰石墨矿	石墨片岩	-27.0	16	南墅石墨矿	花斑状石墨矿	-20.7
5	乌兰石墨矿	石墨片岩	-26.5	17	南墅石墨矿	片麻状石墨矿	-24.0
6	乌兰石墨矿	石墨片岩	-28.3	18	南墅石墨矿	花斑状石墨矿	-26.6
7	鸡西柳毛	石墨片岩	-17.0	19	南墅石墨矿	肠体状大片石墨	-14.7
8	鸡西柳毛	石墨片岩	-23.4	20	南墅石墨矿	大理岩	1.5
9	鸡西柳毛	石墨片岩	-32.1	21	南墅石墨矿	大理岩	0.8
10	鸡西柳毛	石墨片岩	-24.4	22	南墅石墨矿	大理岩	-2.7
11	鸡西柳毛	大理岩	-5.6	23	渤海油田	原油	-26.3
12	鸡西柳毛	大理岩	-1.6	24	渤海油田	原油	-25.7

续表 1

序号	研究区	岩性	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	序号	研究区	岩性	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$
25	渤海油田	原油	-24.1	35	现代有机质	氯仿 A	-24.3
26	渤海油田	原油	-27.2	36	现代有机质	氯仿 A	-25.5
27	浙江康山	沥青	-20.9	37	现代有机质	氯仿 A	-26.5
28	浙江康山	沥青煤	-31.2	38	现代有机质	氯仿 A	-27.3
29	浙江康山	粉煤	-28.8	39	现代有机质	泥碳土	-30.0
30	浙江康山	块煤	-29.4	40	各地石灰岩	灰岩	-9.2
31	现代动植物	马尾藻氯仿抽提物	-20.2	41	各地石灰岩	灰岩	-4.9
32	现代动植物	金鱼藻	-15.6	42	各地石灰岩	灰岩	5.6
33	现代动植物	浮游动物	-21.7	43	各地石灰岩	白云岩	1.5
34	现代动植物	无翅猎毛菜	-27.7				

注:序号 1~6 为笔者分析结果;序号 7~14 数据来源于李光辉等,2008;序号 15~43 数据来源于兰心俨等,1981。测试单位为中国科学院地质与地球物理研究所稳定同位素地球化学实验室。

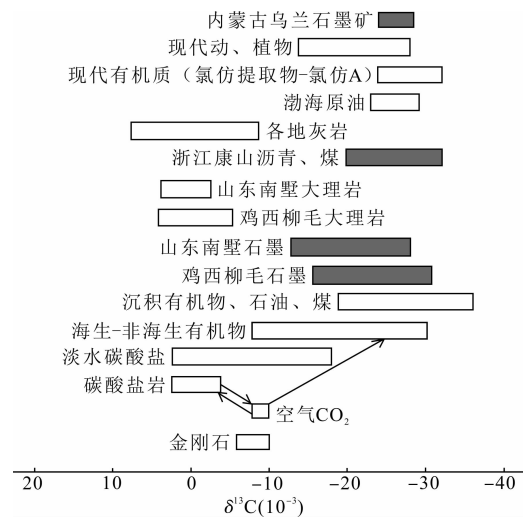


图 6 石墨矿及相关物质 $\delta^{13}\text{C}$ 含量对比图

Fig. 6 Comparison of $\delta^{13}\text{C}$ in graphite deposit and related substances

4.2 含矿建造类型

甘盛飞认为新太古界乌拉山群由一套深变质岩系组成,变质温度为 750~850 ℃,变质压力为 700~900 MPa,属于偏低的中压麻粒岩相(甘盛飞,1991);崔文元认为乌拉山群 2 500 Ma 左右发生了麻粒岩相变质作用,变质温度为 820~890 ℃(崔文元,1989)。通过对本工区的 15 个石墨矿石差热分析样品分析(表 2),其最大放热峰值有 2 个低于 850 ℃,为 726 ℃和 830 ℃,其余均在 900~1 030 ℃,差热曲线见图 7。一般绿片岩相为 400~700 ℃,角闪岩相为 700~850 ℃,麻粒岩相在 850 ℃以上,反映石墨矿成矿变质程度达到角闪岩相和麻粒岩相。因此,乌拉山群含矿岩系受地层层位控制,为一套典型的可达麻粒岩相的高温变质富铝沉积岩组合含矿建造。

表 2 石墨差热分析结果表

Tab. 2 The results of graphite differential thermal analysis

序号	岩性定名	石墨放热峰值(℃)	序号	岩性定名	石墨放热峰值(℃)
1	矽线石石墨片岩	726	9	石墨变粒岩	935
2	矽线石石墨片岩	1 030	10	石墨变粒岩	950
3	石墨黑云石英片岩	830	11	石墨变粒岩	1 015
4	石墨黑云石英片岩	1 030	12	石墨变粒岩	925
5	石墨变粒岩	920	13	石墨变粒岩	1 015
6	石墨变粒岩	961	14	石墨变粒岩	900
7	矽线石石墨片岩	1 003	15	石墨片岩	900
8	矽线石石墨片岩	950			

注:测试单位为国家建筑材料工业地质工程勘察研究院测试中心,2012。

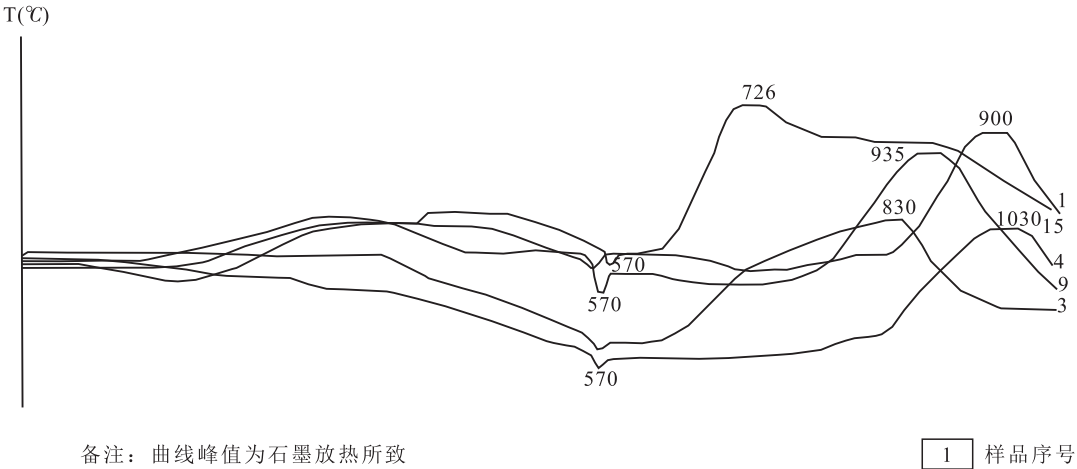


图 7 乌兰一带石墨差热曲线图

Fig. 7 Diagram of Graphite differential thermal in Wulan area

4.3 成矿机制

4.3.1 碳质泥岩区域变质形成石墨矿

2.3 Ga 年前,世界少有生物活动,2.3 Ga 年之后,全球为稳定的沉积环境。第一次全球性沉积磷矿时期开始,并且叠层石大量发育,生物活动剧烈增强,有机成因石墨矿相继被报道(陈衍景,1990)。太古代中期,华北陆块在特定的沉积环境下,有大量的原核生物(主要是兰藻和微古植物)的繁殖(范清玲等,1986)。区域动热变质温压条件下,经过有机碳裂解成单质碳,单质碳结晶成石墨等 2 个基本物理化学过程形成鳞片状结晶石墨(边敏等,2018);晚太古代,研究区发育滨海-前海沉积体系,形成了一套由富铝沉积岩-碳酸盐组成的地层序列,沉积环境为还原环境,稳定的沉积环境控制了碳质、泥质等陆源碎屑物的搬运和沉积,因水体缺氧,有利于厌氧细菌繁殖,大量的有机碳被分解在岩层中沉积保存下来,形成含碳沉积物,为石墨形成提供了物质来源,经过区域变质作用提供外界能量,原岩中的有机质重新结晶形成石墨矿。

4.3.2 岩体接触变质富集成矿

在岩浆侵入过程中对围岩发生同化作用,侵入体与围岩的接触带更加明显。岩浆同化作用使围岩中的碳质结晶成石墨(袁见齐等,1985)。前人研究发现岩浆热液烘烤接触变质,石墨结晶,片度增大,富集成矿(姜高珍等,2017;马志鑫等,2018;张艳飞等,2018)。调查表明,区内后期岩浆活动频繁,其中以华力西期酸性岩分布较广,中细粒二长花岗岩、似

斑状黑云二长花岗岩侵入到乌拉山岩群中,为石墨结晶提供热源,引起围岩温度升高,接触带附近含石墨岩系发生了强烈的重结晶作用,矿石的粒度变粗,品位变富,形成高质量的石墨矿,远离岩体的乌拉山岩群未发生石墨矿化。

4.3.3 构造变形与成矿作用

韧性剪切带是石墨矿床形成和转变的导矿构造和控矿构造,使石墨矿从无序到有序,使早先富集的碳在有利的成矿空间与环境中得到再次集中与富集(刘金中等,1989;吴正伟等,2008;彭素霞等,2018)。矿区韧性剪切方向基本一致,但宽窄不一,石墨矿明显受韧性剪切构造控制;矿石变形可达糜棱片岩、千糜岩。由于石墨矿岩性较软,容易产生滑动变形,含矿层经常沿韧性剪切带分布,而且矿层经常为剪切中心发育的糜棱岩带,使石墨有序排列,不断集中富集,形成透镜状、似层状、膨胀状石墨矿体,局部构造变形使石墨矿在褶皱转折端富集成矿;石墨变量与变形强度存在较好的相关关系(图 8)(刘金中等,1989)。内蒙古兴和石墨矿位于向斜转折端,形成大型团块状、透镜状矿体,后期变形提高矿石品质(据马旭东等,2019)。

变质岩中石墨矿形成是一个复杂的自然过程,包括含碳质流体的渗透、反应和混合作用(杨学明等,2000)。人造碳的研究结果表明,加热时间及其温压条件是影响碳质石墨化作用的关键条件,石墨矿化程度、碳颗粒大小及形态与变质程度呈正相关关系,而只有在区域动热变质的温压条件下,才能提

供形成鳞片状结晶石墨的能量。在变质岩中,除了上述因素外,碳的原始物质的种类和原岩的类型也会影响碳质物质的石墨化作用(黄伯钧等,1986;边敏等,2018)。多种实验表明不同碳质有机化合物转变成石墨的途径和难易程度不同(黄伯钧等,1986),石墨含量总体与变形具有正相关关系,变形程度较强则石墨含量较高,变形程度较弱则石墨含量较低(刘金中等,1989)。有流体加入的韧性剪切带比剪切带外围的同一岩性含矿岩石的石墨片度大的多(边敏等,2018),大鳞片品质石墨矿形成是区域变质作用、混合岩化作用和岩浆作用等叠加的结果(寿立勇,2018)。由此可见,影响碳质石墨矿化作用的因素中,变质作用、温压条件、热作用与韧性剪切关系密切;碳的原始组成和原岩类型等对变质作用也有一定影响。因此,石墨矿床是沉积成岩过程、区域变质过程、接触变质作用及构造变形等一系列地质过程相互作用的结果。

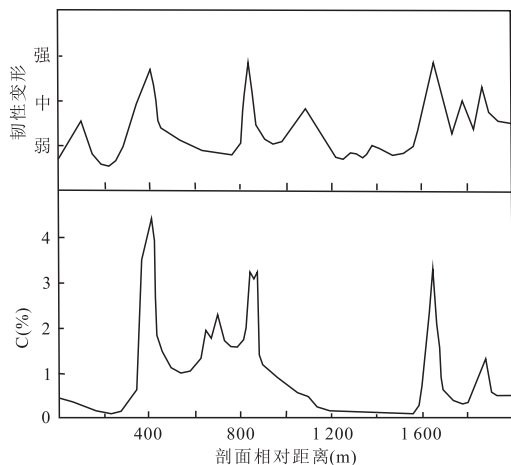


图8 石墨含量与变形强度关系图(据刘金中等,1989)

Fig. 8 Relationship between graphite content and deformation strength(According to LIU Jinzhong et al., 1989)

5 结论

乌兰石墨矿是一处品质石墨矿,固定碳含量FC.d为2.95%~8.50%,含矿地层为石墨石英片岩、石墨变粒岩及石墨片麻岩,原岩属于滨海-前海环境,为一套典型的可达麻粒岩相的高温变质富铝沉积岩组合含矿建造。

乌兰石墨矿形成于高温还原环境中,为中-深区域变质成因,变质温度为826~1 030℃,变质相为

角闪岩相-麻粒岩相, $\delta^{13}\text{C}$ 含量为-24.123‰~-28.602‰,碳质来源为地层中同源沉积的生物有机碳。

笔者初步提出乌兰石墨矿成矿机制:在稳定的滨浅海还原环境,富含有机质沉积物经区域中-深变质作用,有机质被分解重结晶形成石墨矿源层,并在华力西期花岗岩接触变质使石墨片度增大,后期遭受韧性剪切富集形成石墨矿。

参考文献(References):

- 姜高珍,李以科,王安建,等. 内蒙古乌拉特中旗大乌淀石墨矿成因特征分析[J]. 地学前缘,2017,24(5):306-316.
- JIANG Gaozhen, LI Yike, WANG Anjian, et al. Genetic features of Dawudian graphite deposit in Urad Middle Banner, Inner Mongolia[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(5):306-316.
- 兰心俨. 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[J]. 长春地质学院学报,1981(3):30-42.
- LAN Xinyan. Characteristics of Precambrian graphite-bearing formation and Genesis of graphite deposit in Nanshu, Shandong Province [J]. Journal of Changchun University Earth Science, 1981(3):30-42.
- 李寒滨,张冰. 黑龙江云山石墨矿床变质作用及其意义[J]. 中国非金属矿工业导刊,2014(01):45-46.
- LI Hanbin, ZHANG Bing. Metamorphism and Its Significance of Yunshan Graphite in Heilongjing [J]. China Non-Metallic Minerals Industry, 2014(01):45-46.
- 李超,王登红,赵鸿,等. 中国石墨矿床成矿规律概要[J]. 矿床地质,2015,34(06):1223-1236.
- LI Chao, WANG Denghong, ZHAO Hong, et al. Minerogenetic regularity of graphite deposits in China[J]. Deposit Geology, 2015, 34(06):1223-1236.
- 张清平,田成胜. 湖北三岔坪石墨矿地质特征及成因分析[J]. 中国非金属矿工业导刊,2011,(增刊):44.
- ZHANG Qingping, TIAN Chengsheng. Geological characteristics and genetic analysis of Sanchaya graphite deposits in Hubei Province [J]. China Non-Metallic Minerals Industry, 2011, (s):44.
- 柴静,刘树友. 鸡西柳毛石墨矿床地质特征及成因浅析[J]. 黑龙江地质,1992,3(2):47-55.
- CHAI Jing, LIU Shuyou. Geological characteristics and Genesis from Liunao graphite formation in Jixi [J]. Hei-

- longjiang Geology, 1992, 3(2):47-55.
- 张国新, 胡霭琴, 张鸿斌, 等. 新疆苏吉泉石墨矿床成因的碳同位素证据[J]. 地球化学, 1996, 25(4):379-386.
- ZHANG Guoxin, HU Aiqin, ZHANG Hongbin, et al. Carbon isotopic evidence for the origin of the spherical graphite in a granite-hosted graphite deposit, sujiuan Xinjing, China[J]. Geochemistry, 1996, 25(4):379-386.
- 陈毓川, 薛春纪, 王登红, 等. 华北陆块北缘区域矿床成矿谱系探讨[J]. 高校地质学报, 2003, 9(4):520-535.
- CHEN Yuchuan, XUE Chunji, WANG Denghong, et al. A Discussion on the Regional Pedigree of the ore deposits in the Northern Margin of the North China Landmass [J]. Geological Journal of China Universities, 2003, 9(4):520-535.
- 翟明国. 华北克拉通的形成演化与成矿作用[J]. 矿床地质, 2010, 29(1):24-36.
- ZHAI Mingguo. Tectonic evolution and metallogenesis of North China Craton [J]. Mineral Deposits, 2010, 29(1):24-36.
- 张瑞英, 张成立, 孙勇. 华北克拉通~2.5Ga地壳再造事件:来自中条山TTG质片麻岩的证据[J]. 岩石学报, 2013, 29(7):2265-2280.
- ZHANG Ruiying, ZHANG Chengli, SUN Yong. Crustal reworking in the North China Craton at~2.5Ga: Evidence from zircon U-Pb ages, Hf isotopes and whole-rock geochemistry of the TTG gneisses in the Zhongtiao Mountain [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(7):2265-2280.
- 翟明国. 克拉通化与华北陆块的形成[J]. 中国科学:地球科学, 2011, 41(8):1037-1046.
- ZHAI Mingguo. Cratonization and the formation of the north China Block [J]. Science China:Earth Science, 2011, 41(8):1037-1046.
- 赵宗溥. 中朝准地台前寒武纪地壳演化[M]. 北京:科学出版社, 1993.
- ZHAO Zongpu. Precambrian crustal evolution of the sino-korean paraplatform [M]. Beijing: Science Press, 1993.
- 翟明国. 新太古代全球克拉通事件与太古宙-元古宙分界的地质涵义[J]. 大地构造与成矿学, 2006, 30(4):419-421.
- ZHAI Mingguo. Geological significance of the neoproterozoic global cratonization event and the boundary between archaic and proterozoic [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2006, 30(4):419-421.
- 李旭平, 王哈, 孔凡梅. 高温-超高温变质作用成因研究——来自华北克拉通西部孔兹岩带和南非 Kaapvaal 克拉通西南部 Namaqua 活动带与 Bushveld 变质杂岩体的启示 [J]. 岩石学报, 2019, 35(2):295-311.
- LI Xuping, WANG Han, KONG Fanmei. Probe into the high temperature-ultrahigh temperature metamorphism: The enlightenment from the Western Khondalite Belt of the North China Craton and the Namaqua mobile belt and the Bushveld metamorphic complex of South Africa [J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(2):295-311.
- 肖伟, 聂凤军, 刘翼飞, 等. 内蒙古长山壕金矿区花岗岩同位素年代学研究及地质意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(2):535-543.
- XIAO Wei, NIE Fengjun, LIU Yifei, et al. Isotope geochronology study of the granitoid intrusions in the Changshanhao gold deposit and geological implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(2):535-543.
- 孙德育, 梁一鸿, 张业明. 内蒙武川—固阳—大余太韧性剪切带与金矿 [J]. 长春地质学院学报, 1990(4):399-406+428.
- SUN Deyu, LIANG Yihong, ZHANG Yeming. Ductile shear zone and gold deposits in wuchuan-guyang-dashetai inner mongolia [J]. Journal of Changchun University Earth Science, 1990(4):399-406+428.
- 邵积东. 对内蒙古太古代地层划分及形成时代的重新认识 [J]. 西部资源, 2015(1):154-161.
- SHAO Jidong. A new understanding of Archean stratigraphic division and Formation Age in Inner Mongolia [J]. Western Resources, 2015(1):154-161.
- 曹毅, 聂凤军, 肖伟, 等. 初论内蒙古长山壕金矿床的成矿时限 [J]. 岩石学报, 2014, 30(7):2092-2100.
- CAO Yi, NIE Fengjun, XIAO Wei, et al. Metallogenic age of the Changshanhao gold deposit in Inner Mongolia, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(7):2092-2100.
- 彭润民, 翟裕生, 韩雪峰, 等. 内蒙古狼山造山带构造演化与成矿响应 [J]. 岩石学报, 2007, 23(3):679-688.
- PENG Runming, ZHAI Yusheng, HAN Xuefeng, et al. Mineralization response to the structural evolution in the Langshan orogenic belt, Inner Mongolia [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(3):679-688.
- 翟明国, 胡波, 彭澎, 等. 华北中—新元古代的岩浆作用与多期裂谷事件 [J]. 地学前缘, 2014, 21(1):100-119.

- ZHAI Mingguo, HU Bo, PENG Peng, et al. Meso-Neoproterozoic magmatic events and multi-stage rifting in the NCC[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(1): 100-119.
- 李树才, 等. 内蒙古 1:5 万乌兰岗幅(K49E012004)、乌兰幅(K49E013004)、角力格太幅(K49E014004)、哈台山幅(K49E015004)区域地质调查报告[R]. 内蒙古: 国土资源实物地质资料中心, 2011.
- LI Shucai, et al. Regional Geological Survey Report of wulangang sheet (K49E012004), Wulan sheet (K49E013004), Jiaoligetai sheet (K49E014004) and Hatai Mountain Sheet (K49E015004) in Inner Mongolia [R]. Inner Mongolia: Cores and Samples Center of Lang and Resources, 2011.
- 陈衍景, 刘丛强, 陈华勇, 等. 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[J]. *岩石学报*, 2002, 16(2): 233-244.
- CHEN Yanjing, LIU Congqiang, CHEN Huayong, et al. Carbon isotope geochemistry of graphite deposits and ore-bearing khondalite series in North China implications for several geoscientific problems[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 16(2): 233-244.
- 莫如爵. 中国石墨矿床地质[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
- MO Rujue. *Geology of graphite deposits in China* [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 1989.
- 李光辉, 黄永卫, 吴润堂, 等. 鸡西柳毛石墨矿碳质来源及铀、钒的富集机制[J]. *世界地质*, 2008, 27(1): 19-22.
- LI Guanghui, HANG Yongwei, WU Runtang, et al. Origin of carbon and concentration of uranium and vanadium from Liumao graphite formation in Jixi[J]. *Global Geology*, 2008, 27(1): 19-22.
- 甘盛飞. 内蒙古乌拉山群麻粒岩相岩石的变质温压条件[J]. *矿物岩石*, 1991(02): 10-18.
- GAN Shengfei. Metamorphic P-T conditions of the rocks of archaean (wulashan group) granulite facies in Inner Mongolia, North China[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 1991(02): 10-18.
- 崔文元. 地质温压计在研究华北地台北缘麻粒岩带变质作用中的应用[J]. *矿物岩石地球化学通讯*, 1989(02): 108-110.
- CUI Wenyuan. Application of geothermometers in the study of granulite belt metamorphism in the northern margin of north China Platform [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 1989(02): 108-110.
- 陈衍景. 23 亿年地质环境突变的证据及若干问题的讨论[J]. *地层学杂志*, 1990(03): 178-186.
- CHEN Yanjing. Evidence of abrupt change of geological environment in 2.3 billion years and discussion on some problems [J]. *Journal of Stratigraphy*, 1990 (03): 178-186.
- 苑清玲, 李齐白. 内蒙兴和石墨矿区变质岩系的原岩恢复及石墨矿床的成因探讨[J]. *四川建材学院学报*, 1986(01): 17-32.
- YUAN Qingling, LI Qibai. Recover of the original rocks of metamorphic and the geneses of graphite deposit research in Xing-he, Inner Mongolia [J]. *Journal of Sichuan Institute of Building Materials*, 1986(01): 17-32.
- 边敏, 程林, 姚敬劬. 区域变质型品质石墨矿石墨生成的热力学分析[J]. *矿产与地质*, 2018, 32(1): 97-100.
- BIAN Min, CHENG Lin, YAO Jingqu. Thermodynamics research of graphite forming in regional metamorphic graphite deposits [J]. *Mineral Resources and Geology*, 2018, 32(1): 97-100.
- 袁见齐, 朱上庆, 翟裕生. 矿床学[M]. 北京: 地质出版社, 1985.
- YUAN Jianqi, ZHU Shangqing, ZHAI Yusheng. *Mineralogy* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985.
- 马志鑫, 罗茂金, 刘喜停, 等. 四川南江坪河石墨矿炭质来源及成矿机制[J]. *地质科技情报*, 2018, 37(3): 134-139.
- MA Zhixin, LUO Maojin, LIU Xiting, et al. Carbon source and metallogenic mechanism of Pinghe graphite deposit at Nanjiang, Sichuan Province [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2018, 37(3): 134-139.
- 张艳飞, 梁帅. 内蒙古大乌淀石墨矿地质特征与成因探讨[J]. *地质找矿论丛*, 2018, 33(02): 205-213.
- ZHANG Yanfei, LIANG Shuai. Geological characteristics and genesis of Dawudian graphite deposit in Inner Mongolia [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2018, 33(2): 205-213.
- 刘金中, 钱祥麟, 陈亚平. 中国内蒙中部孔兹岩系中石墨矿的构造成因[J]. *大地构造与成矿学*, 1989(2): 162-167.
- LIU Jinzhong, QIAN Xianglin, CHEN Yaping. The tectonic origin of graphite deposits in the khondalite group, the middle part of inner Mongolia, China [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 1989(2): 162-167.
- 吴正伟, 姚立. 冀北龙关石墨矿区的韧性剪切带及其控矿机理[J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2008(5): 51-54.

- WU Zhengwei, YAO Li. The ductile shear zone controls the forming of longguan graphite deposit in eastern Hebei [J]. China Non-Metallic Minerals Industry, 2008(5): 51-54.
- 彭素霞, 陈向阳, 陈隽璐, 等. 新疆东准噶尔地区石墨矿成矿特征及成因探讨[J]. 西北地质, 2018, 51(04): 194-201.
- PENG Suxia, CHEN Xiangyang, CHEN Junlu, et al. Metallogenic geological characteristics and genesis of the graphite ore belt in east junggar, Xinjiang [J]. Northwestern Geology, 2018, 51(04): 194-201.
- 马旭东, 钟焱, 陈雅丽, 等. 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[J]. 大地构造与成矿学, 2019, 43(06): 1155-1168.
- MA Xudong, ZHONG Yan, CHEN Yali, et al. Sdimentray process controls on the graphite mineralized in the khondalite series, Western North China Craton [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2019, 43(06): 1155-1168.
- 杨学明, 杨晓勇. 岩石地球化学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2000.
- YANG Xueming, YANG Xiaoyong. Rock Geochemistry [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Publishing House, 2000.
- 黄伯钧, Peter R. Buseck. 变质岩中碳质物质的石墨化作用 [J]. 矿物学报, 1986(4): 350-353+388.
- HUANG Bojun, Peter R. Buseck. Graphitization of carbonaceous material in metamorphic rocks [J]. Acta Mineralogica Sinica, 1986(4): 350-353+388.
- 黄伯钧, Peter R. Buseck. 几种人造碳的微结构的高分辨电子显微镜研究 [J]. 矿物学报, 1986(3): 211-216+291.
- HUANG Bojun, Peter R. Buseck. Microstructure of some synthetic carbons by high resolution electron microscopy [J]. Acta Mineralogica Sinica, 1986(3): 211-216+291.
- 寿立永. 陕西省石墨矿成矿特征及成矿区带划分 [J]. 西北地质, 2018, 51(3): 185-191.
- SHOU Liyong. Metallogenic Characteristics and Mineralization Zoning of Granite Deposits in Shaanxi Province [J]. Northwestern Geology, 2018, 51(3): 185-191.
- Bai Q, Zhang S T, Wang W L, et al. Variance of graphite import-export volume and price in China for 2003-2012: a time-series analysis [J]. Resources Policy, 2015, 44: 65-70
- Liu D Y, Nutman A P, Compston W, et al. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton [J]. Geology, 1992, 20 (4): 339-342.
- Zhai M G, Guo J H, Liu W J. Neoarchean to Paleoproterozoic continental evolution and tectonic history of the North China Craton: a review [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2005, 24 (5): 547-561.
- Sanyal P, Acharya B C, Bhattacharya S K, et al. Origin of graphite, and temperature of metamorphism in Precambrian Easatem Ghats Mobile Belt, Orissa, India: a carbon isotope approach [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 36(2/3): 252-260.
- Luo G, Junium C K, Kump L R, et al. Shallow stratification prevailed for ~ 1700 to ~ 1300 Ma ocean: evidence from organic carbon isotopes in the North China Craton [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2014, 400: 219-232.
- Mizutani S, Satish-Kumar M, Yoshino T. Experimental determination of carbon isotope fractionation between graphite carbonated silicate melt under upper mantle conditions [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2014, 392: 86-93.
- Luque F J, Crespo-Feo E, Barrenechea J F, et al. Carbon isotopes of graphite: implications on fluid history [J]. Geoscience Frontiers, 2012, 3(2): 197-207.
- Santosh M, Wada H, Satish-Kumar M, et al. Carbon isotopes "stratigraphy" in a single graphite crystal: implications for the crystal growth mechanism of fluid-deposited graphite [J]. American Mineralogist, 2003, 88: 1689-1696.