



陕西省丹凤县北部晶质石墨矿床控矿条件分析及找矿前景

严鹏程, 寿立永, 杨联涛, 尚凯凯

中国建筑材料工业地质勘查中心陕西总队, 陕西 西安 710003

摘 要: 从区域变质、岩浆作用、构造作用等方面, 对丹凤北部晶质石墨矿床的控矿条件进行了深入分析, 认为丹凤北部晶质石墨矿床成因为区域变质型, 并提出了区域变质+花岗“热穹”叠加变质改造+构造改造的成矿模式。进一步指出了瓦窑沟、回头山、波风岭一带为寻找石墨的远景区。

关键词: 晶质石墨矿; 控矿条件; 找矿前景; 成矿模式; 陕西省

ORE-CONTROLLING CONDITIONS AND PROSPECTING POTENTIAL OF CRYSTALLINE GRAPHITE DEPOSITS IN NORTHERN DANFENG COUNTY, SHAANXI PROVINCE

YAN Peng-cheng, SHOU Li-yong, YANG Lian-tao, SHANG Kai-kai

Shaanxi Branch, China National Geological Exploration Center of Building Materials Industry, Xi'an 710003, China

Abstract: The ore-controlling conditions of crystalline graphite deposits in northern Danfeng County are analyzed from the aspects of regional metamorphism, magmatism and tectonism. It is considered that the deposits are genetically regional metamorphic type, with the metallogenic model of regional metamorphism + granitic thermal dome superimposed by metamorphism + tectonic transformation. It is further pointed out that the areas of Wayaogou, Huitoushan and Bofengling are prospective for graphite prospecting.

Key words: crystalline graphite deposit; ore-controlling condition; prospecting potential; metallogenic model; Shaanxi Province

0 引言

丹凤北部区域大地构造属于北秦岭复合岛弧杂岩带, 其夹持于洛南-栾川断裂和商丹断裂之间, 是秦岭造山带变质变形最为强烈的地区^[1](图 1)。丹凤北部地区石墨矿床均赋存于秦岭岩群雁岭沟岩组^[2]。秦岭岩群是北秦岭变质地体的主体, 是一套经历了多期变质变形改造的中深变质杂岩体^[3], 主要由各种长英质

片麻岩、片岩和大理岩组成, 以普遍出现黑云母、石墨、夕线石、蓝晶石、石榴子石等变质矿物为特征, 岩石变形复杂并具深熔作用, 被认为是秦岭造山带最古老的前寒武纪变质结晶基底^[4]。

独特的构造格局及多期次复杂的变形变质作用, 为该区晶质石墨矿床的形成提供了良好的成矿条件。自 20 世纪 70 年代至今, 该区先后发现了大西沟、碾子

收稿日期: 2022-04-08; 修回日期: 2022-06-06。编辑: 李兰英。

基金项目: 陕西省自然资源厅基金项目“陕西省丹凤县庾家河晶质石墨矿普查”(61201304227)、“陕西省商洛市瓦窑沟晶质石墨矿普查”(61201707327)、“陕西省商洛市商州区孙家岩晶质石墨矿普查”(61202110399)。

作者简介: 严鹏程(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事固体矿产勘查找矿工作, 通信地址 陕西省西安市北大街 444 号, E-mail//417813424@qq.com

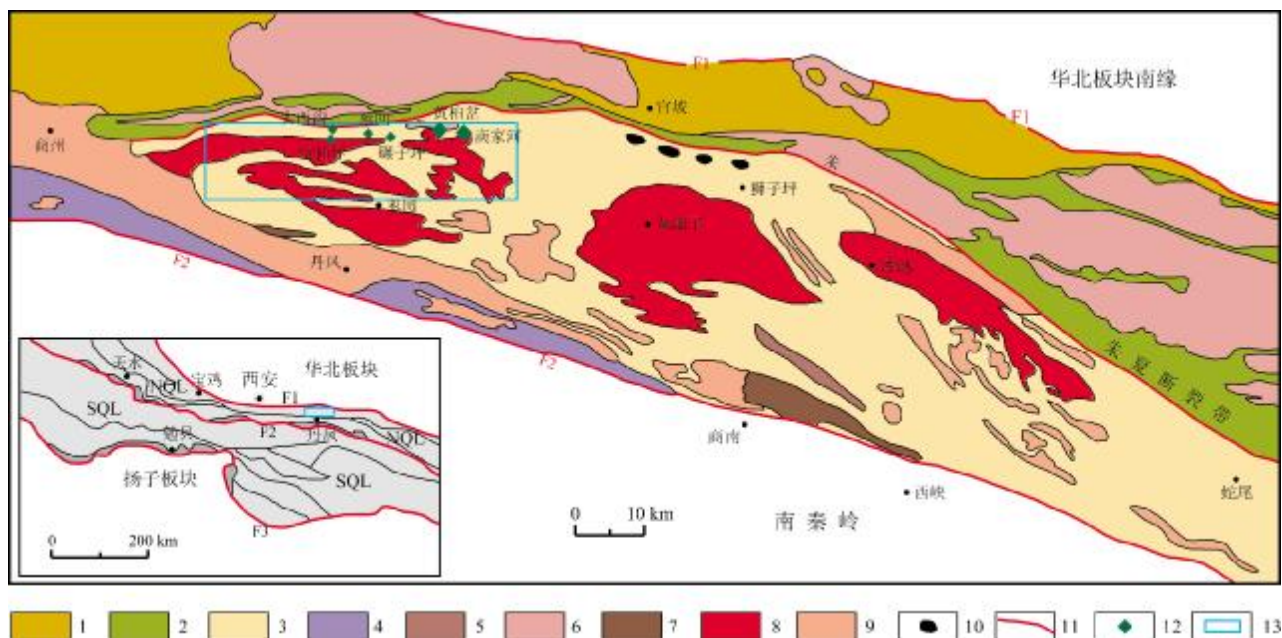


图 1 北秦岭地质构造简图

(据文献[1]修改)

Fig. 1 Tectonic sketch map of North Qinling Mountains

(Modified from Reference [1])

1—宽坪单元(Kuanping unit); 2—二郎坪单元(Erlangping unit); 3—北秦岭单元(North Qinling unit); 4—蛇绿混杂岩(ophiolitic melange); 5—橄榄岩(peridotite); 6—中生带花岗岩(Mesozoic granite); 7—古生代辉长岩(Paleozoic gabbro); 8—古生代花岗岩(Paleozoic granite); 9—新元古代花岗岩(Neoproterozoic granite); 10—新元古代玄武岩/榴辉岩(Neoproterozoic basalt/eclogite); 11—断裂带(fault zone); 12—石墨矿床(graphite deposit); 13—研究区(study area); NQL—北秦岭构造带(North Qinling tectonic belt); SQL—南秦岭构造带(South Qinling tectonic belt); F1—洛南—栾川断裂(Luonan-Luanchuan fault); F2—商丹断裂(Shang-Dan fault); F3—勉略—巴山—大别山断裂(Mianlue-Bashan-Dabieshan fault)

坪、蔡凹、留仙坪中型石墨矿床和庾家河、黄柏岔等大型石墨矿床^[5],使得丹凤北部地区成为了陕西省重要的晶质石墨矿集区。前人研究普遍认为丹凤北部晶质石墨矿床成因为区域变质型,但对该区石墨矿受后期岩浆、构造作用改造研究相对薄弱。本文通过系统研究总结丹凤北部多个石墨矿床的地质特征,从区域变质、岩浆作用、构造作用等方面,对晶质石墨矿床的控矿条件进行分析,以期今后该区石墨矿床勘查提供参考。

1 地质特征

丹凤北部石墨矿床含矿建造为一套结晶片岩和大理岩,即黑云斜长片麻岩、夕线石石墨片岩、透辉石大理岩、石墨大理岩、斜长角闪岩等(图2)。通过对丹凤北部已发现的石墨矿床矿体特征进行归纳总结,该区石墨矿床具有如下地质特征。

(1)石墨矿体呈层状、似层状展布,具有层控特征。矿体一般长100~700 m,最长3 230 m(黄柏岔石墨矿床K I₁矿体),厚度一般3.0~10.5 m,最厚50.83 m。

(2)石墨固定碳含量一般为4.27%~7.64%,最高为24.61%。该区石墨矿床平均品位5.79%。

(3)石墨矿石类型简单。主要为石墨大理岩,次为石墨片麻岩、石墨片岩,还有少量石墨变粒岩。矿石具鳞片粒状变晶结构,薄层状、片麻状、片状构造。石墨大理岩中,石墨鳞片以填隙方式杂乱生长于方解石矿物颗粒之间。石墨片麻岩中,石墨呈片状,长轴平行片麻理方向,断续定向排列,集合体呈稠密浸染状,沿片麻理方向定向生长。石墨石英片岩中,石墨定向排列十分明显,沿片理方向呈平行的条带状生长。石墨变粒岩中,石墨多定向或在石英、长石颗粒间杂乱分布。

(4)矿层中夹石发育。矿层中夹石分为两种。一种为含矿夹石,即含石墨大理岩、含石墨片麻岩和含石墨

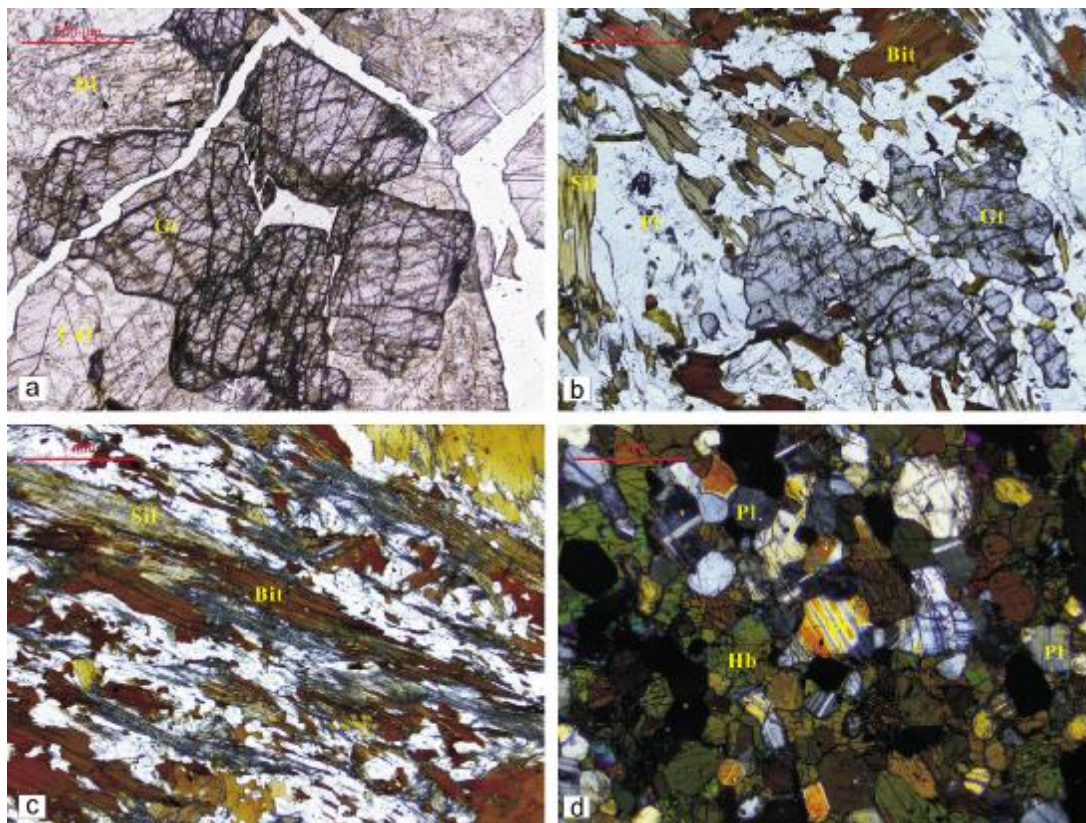


图2 矿区岩石显微照片

Fig. 2 Microphotographs of rocks in the orefield

a—透闪石钙铝榴石透辉石大理岩,单偏光,矿物组合:方解石+透辉石+钙铝榴石+透闪石(tremolite grossularite diopside marble, PPL, calcite+diopside+grossularite+tremolite); b—黑云母夕线石片岩,正交偏光,矿物组合:夕线石+铁铝榴石+黑云母+斜长石(biotite sillimanite schist, CPL, sillimanite+almandine+biotite+plagioclase); c—黑云母夕线石片岩,正交偏光,夕线石交代黑云母(biotite sillimanite schist, CPL, sillimanite metasomatized by biotite); d—斜长角闪岩,正交偏光,变质重结晶的斜长石和角闪石(plagioclase amphibolite, CPL, metamorphic recrystallized plagioclase and hornblende); Di—透辉石(diopside); Sil—夕线石(sillimanite); Bit—黑云母(biotite); Gt—石榴子石(garnet); Pl—斜长石(plagioclase); Hb—角闪石(hornblende); Cal—方解石(calcite); Ol—橄榄石(olivine)

片岩、含石墨变粒岩。因石墨含量较少,固定碳含量低于边界品位,不能作为矿体,以夹层处理。另一种为不含矿夹石,即大理岩、片麻岩、片岩或是后期侵入矿体的岩体。矿层中夹石分布无规律,多以楔状、透镜状产出,产状与矿层基本一致,规模大小不一,且在小范围内变化较大,对开采时夹石剔除造成一定难度。

(5)石墨矿体受酸性花岗岩体影响较为强烈。在丹凤北部地区已经发现的石墨矿床,均普遍遭受泥盆纪黄柏岔岩体($\eta\gamma D_1$)的侵位影响。

(6)石墨矿体受构造影响大。该区层控石墨矿床普遍表现出构造改造的特征。褶皱、断层均对石墨矿体的产出、形态起到了控制作用。

(7)石墨矿石鳞片片径大。通过大量的光薄片统计,区内石墨片径多介于0.15~0.30 mm,最大片径2 mm

左右。+100目(>0.147 mm)的正目石墨含量占95.33%。矿石工业类型属晶质大鳞片状石墨。

2 控矿条件分析

2.1 区域变质作用

丹凤北部晶质石墨矿的赋矿地层为古元古界秦岭岩群雁岭沟岩组。雁岭沟岩组地层为一套以碳酸盐岩为主体的含石墨变质岩,主要岩性为石墨大理岩、含石墨大理岩夹薄层石英岩及各类片麻岩,变质程度深,总体显示层状无序^[6]。其岩石组合特征表明是由稳定环境下沉积的一套碳酸盐岩夹富铝沉积岩经高级变质作用而来,原岩属一套碳酸盐岩夹碎屑岩建造^[7-8]。从地球化学特征上看,雁岭沟岩组的岩石具有富铝或富钙的特征,硅的含量多数较低,稀土总量 ΣREE 含量总

体较低,与孔兹岩系特征相似^①。

古元古代,秦岭岩群雁岭沟岩组原岩形成于华北古陆南缘,中元古代发生褶皱隆起,构成古岛链^[9]。新元古代(晋宁期),在华北古陆南缘俯冲-碰撞造山背景下,秦岭岩群下冲深埋,使岩石发生区域变质-变形作用,地质体形成区域线性褶皱及强变形带,沉积地层经区域变质作用改造为老变质岩地层^[10]。矿区受晋宁期区域变质作用的影响,形成一系列富钙镁质变质岩、贫钙镁质变质岩、钙镁质变质岩等。富钙镁质变质岩石主要有金云母透辉石大理岩、镁橄榄石方解石大理岩、透闪石钙铝榴石透辉石大理岩(图2a)。贫钙镁质变质岩石主要有黑云母夕线石片岩、夕线石石英石榴石片岩等。夕线石和微斜长石、黑云母、铁铝榴石共生并显示了比较好的粒状镶嵌变晶结构特点(图2b),镜下可见到夕线石交代黑云母的现象(图2c)。钙镁质变质岩石主要有角闪透辉石岩、角闪钾长透辉石岩、斜长角闪岩(图2d)。普通角闪石多色性比角闪岩相深,为棕黄褐色-褐色,斜长石的An均大于30。通过区域资料、矿区岩石矿物特征,本区为高角闪岩相Sil-Kfs变质带,变质相形成条件大致为 $P_{H_2O}=0.2\sim0.3$ GPa, $T=660$ °C^②,属于中高压相系区域变质作用,为晶质石墨矿的形成提供了必需的温压条件^[11]。

现代研究表明,生物成因的有机碳及化学成因的无机碳在一定条件下均可形成石墨^[12]。有机质由于生物化学作用产生碳同位素分馏,使其 $\delta^{13}C$ 有很大的负值^[13],沉积后在成岩过程中不断分解、聚合,变成固体和油气, $\delta^{13}C$ 负值不断加大,最后形成石墨 $\delta^{13}C$ 的区间为 $-25.5\text{‰}\sim-22.5\text{‰}$ ^[14]。海相碳酸盐的 $\delta^{13}C$ 平均值约为0‰,在变质形成大理岩过程中,碳同位素组成 $\delta^{13}C$ 值进一步变大,往往为正值^[15]。依据1984年陕西省地质矿产局第十三地质队在丹凤北部的大西沟-碾子坪-蔡凹石墨矿床所做稳定同位素重分析, $\delta^{13}C$ 为 $-12.34\text{‰}\sim-13.89\text{‰}$ ^[16],其与有机成因石墨 $\delta^{13}C$ 相比偏重,而与海相碳酸盐无机成因石墨 $\delta^{13}C$ 相比又偏轻。

笔者认为,丹凤北部石墨碳质来源应以有机成因为主,无机成因为辅。原始沉积的有机质在区域变质作用过程中形成了晶质石墨矿体,而伴随板块俯冲碳

酸盐矿物经还原反应亦形成了少量石墨,致使该区稳定同位素分析 $\delta^{13}C$ 表现出介于有机成因和无机成因石墨 $\delta^{13}C$ 之间。在元古宙陆间海或陆源海滨带,繁衍了大量的氨基酸、脂肪酸等早期生命物质,叠层石和丝状、杆状碳质体等有机质,伴随沉积作用的聚集、埋藏,导致碳质富集,在晋宁期高角闪岩相高级变质作用过程中,有机质碳在温度、压力及水、二氧化碳等挥发组分的影响下,发生重结晶作用,形成晶质石墨^[17]。丹凤北部石墨矿体所表现出的呈层状、似层状展布的层控特征属性也证实了有机成因。除石墨矿体外,丹凤北部雁岭沟岩组地层大理岩中普遍含有石墨矿物,其含量多小于2%,并且石墨矿物含量高低在空间上并无变化规律。众所周知,地层中有机质埋藏成岩需要特定沉积环境,有机成因显然不能解释整个雁岭沟岩组大理岩地层普遍含有石墨矿物这一特征。分析认为大理岩中不能构成矿体的低含量石墨应属于无机成因,其来源应为碳酸盐矿物。伴随着区域变质作用,俯冲带中碳酸盐岩矿物方解石、白云石通过化学反应脱碳形成 CO_2 含碳流体: $CaCO_3$ (方解石) $\rightarrow CaO$ (硅灰石)+ CO_2 ; $CaMg(CO_3)_2$ (白云石)+ $2SiO_2$ (石英) $\rightarrow CaMgOSi_2O_6$ (透辉石)+ CO_2 。之后含碳流体在还原和低流体通量条件下,碳转变成相对稳定的石墨固存在板片中^[18](图3)。

2.2 岩浆作用

在加里东-海西期,丹凤、二郎坪古生代有限洋盆双向俯冲、闭合,秦岭岩群向西挤压发生抬升改造,并伴随I型、H型花岗岩及中基性岩浆侵入^[19],发生热变质叠加。矿区内大面积出露泥盆纪黄柏盆岩体($\eta\gamma D_1$),其可分为灰白色含石榴石中细粒二长花岗岩和浅肉红色含石榴石钾长花岗岩两个单元。通过大量野外观察及探矿工程控制,区内浅肉红色含石榴石钾长花岗岩对石墨矿体破坏严重,其往往同化混染石墨矿体,导致了石墨矿体形态的复杂化及不连续性。灰白色含石榴石中细粒二长花岗岩对石墨矿体形态、延伸等无影响。且通过定量统计,当矿体顶底板及矿体中穿插灰白色含石榴石中细粒二长花岗岩脉体时,石墨鳞片呈显著增大特征。通过镜下微观特征观察,受灰白色含石榴石中细粒二长花岗岩侵位引起的热变质

① 核工业 203 研究所. 陕西 1:5 万龙驹寨(I49E014010)、峦庄街(I49E014011)幅区调报告. 2015.

② 陕西省地质调查院. 陕西省区域地质志. 2012.

作用的影响,原区域变质形成的糜棱化石英向颗粒石英转变,在颗粒石英接触部位的石墨弯曲度变小,呈平整的长条状展布(图 4). 镜下微观特征表明,在热变质作用下,原区域变质作用形成的晶质石墨比表面积减小,表面能降低,石墨鳞片进一步增大,晶体结构趋于稳定^[20].

2.3 构造作用

北秦岭在晚古生代晚期—三叠纪结束海侵,进入陆内浅层次构造演化新时期,印支期发生自北而南的逆冲推覆造山^[21]. 丹凤北部地区在南北向挤压应力作用下,形成张河—留仙坪—界岭背斜. 该背斜轴线近东西向,长 30 km 以上,轴面近直立,向东倾伏,整个形

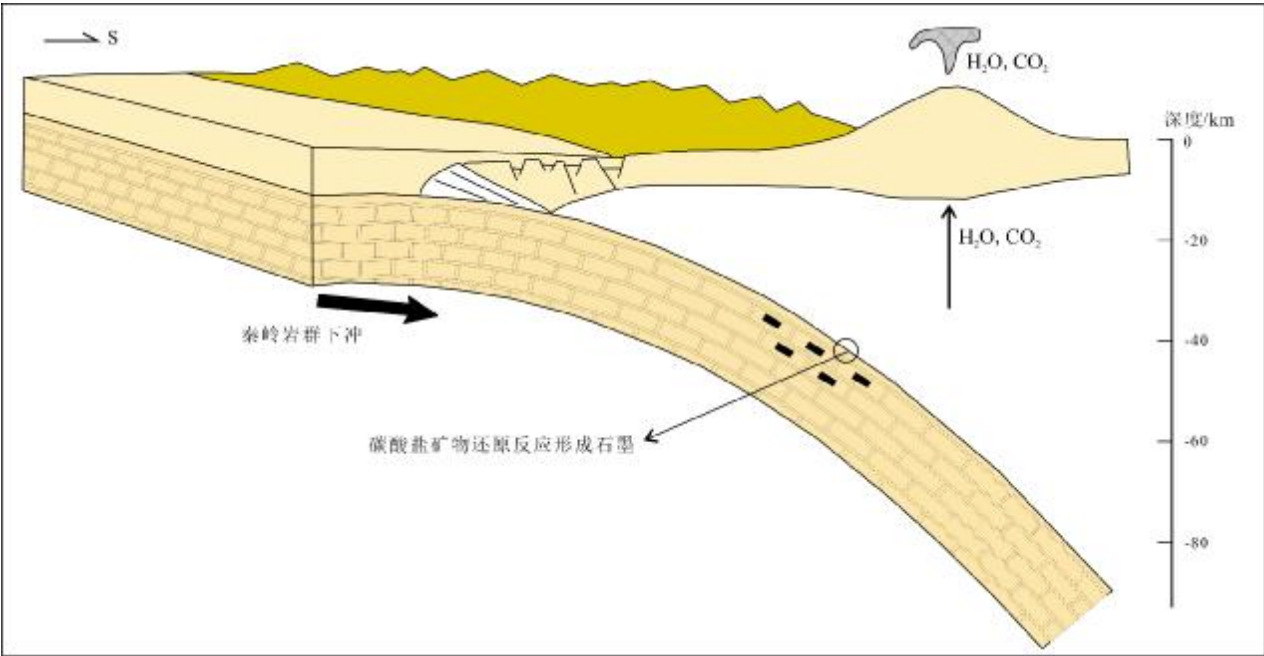


图 3 俯冲带中石墨形成过程示意图
(据文献[18]修改)

Fig. 3 Sketch showing the formation process of graphite in subduction zone
(Modified from Reference[18])

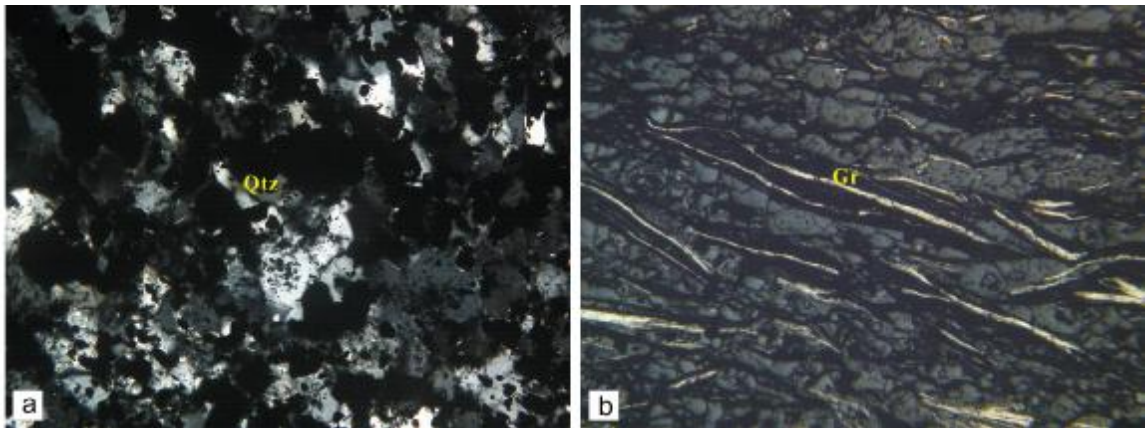


图 4 热变质作用下矿物特征显微照片

Fig. 4 Microphotographs of minerals under thermal metamorphism

a—热变质作用使石英重结晶形成颗粒石英(quartz recrystallizing to form granular quartz under thermal metamorphism); b—热变质作用使石墨鳞片弯曲度变小,呈平整的长条状展布(graphite flakes with gentle bending distributed in long strips under thermal metamorphism); Qtz—石英(quartz); Gr—石墨(graphite)

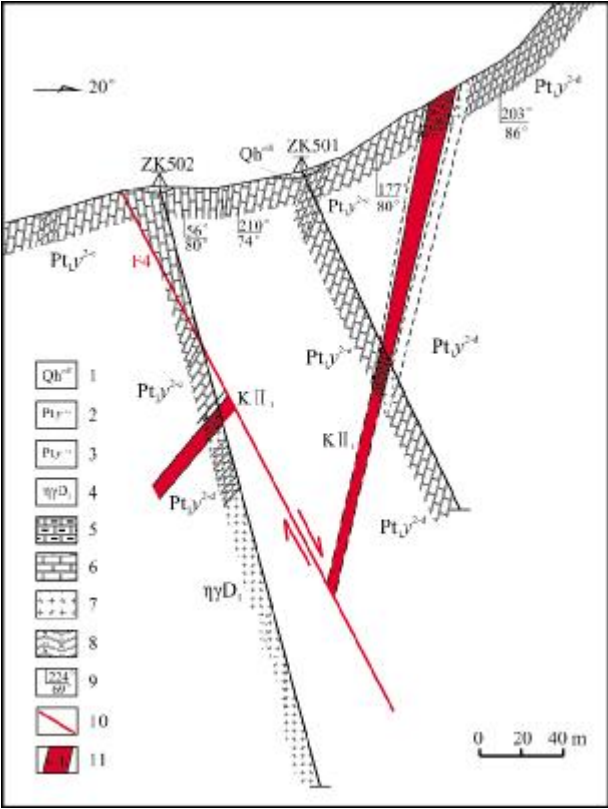


图 6 断层对庾家河石墨矿深部矿体切割图

Fig. 6 Orebody cut by fault in deep of Yujiahe graphite deposit
1—第四系全新统(Quaternary Holocene); 2—雁岭沟岩组第二岩段 e 层(e-layer of the 2nd mem., Yanlinggou fm.); 3—雁岭沟岩组第二岩段 d 层(d-layer of the 2nd rock mem., Yanlinggou fm.); 4—泥盆纪黄柏岔岩体群 (Devonian Huangbaicha rock group); 5—石墨大理岩(graphite marble); 6—大理岩(marble); 7—二长花岗岩(monzogranite); 8—黑云斜长片麻岩 (biotite plagiogneiss); 9—产状(occurrence); 10—断层(fault); 11—石墨矿体及编号(graphite orebody and number)

2.4 控矿条件分析

丹凤北部地区石墨矿体形成于晋宁期区域变质作用，雁岭沟岩组原始含碳地层在高角闪岩相高级变质作用过程中形成石墨矿体，同时高温高压条件下俯冲带中碳酸盐发生化学还原反应形成石墨，为雁岭沟岩组地层贡献了少量的石墨。之后在花岗“热穹”叠加变质过程中，泥盆纪黄柏岔岩体浅肉红色含石榴石钾长花岗岩侵位对石墨矿体造成破坏，而灰白色含石榴石中细粒二长花岗岩侵位引起的热变质作用的影响，使得石墨鳞片进一步增大。印支期变形形成的张河-留仙坪-界岭背斜则直接控制了矿体的空间分布形态，即丹凤北部晶质石墨矿成矿模式为：区域变质+花岗“热穹”叠加变质改造+构造改造，各期地质作用对矿

石矿物的影响见图 7。

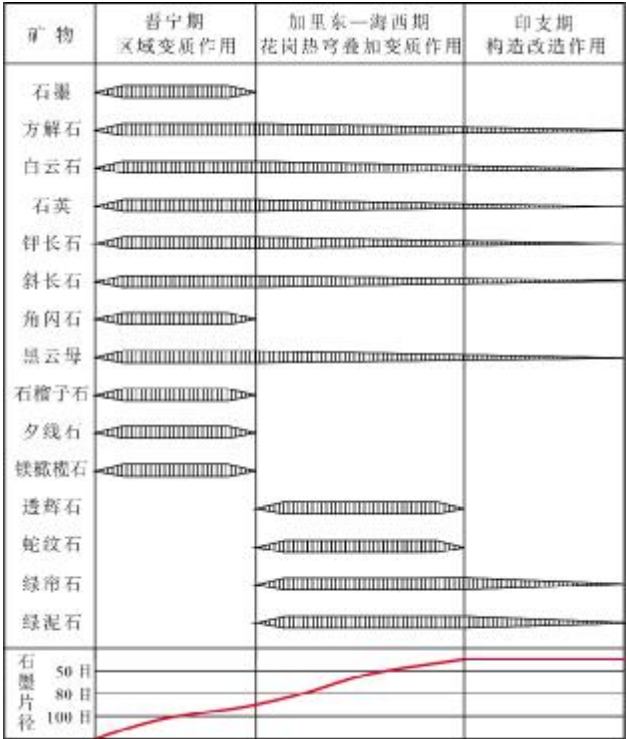


图 7 不同时期地质作用对石墨矿石矿物的影响

Fig. 7 Effect of geological processes in different periods on minerals in graphite deposit

3 找矿前景

依据前述丹凤北部地区石墨矿控矿地层、控矿构造、岩浆活动、多期次变质作用等因素分析，认为丹凤北部地区石墨矿成矿地质条件优越，具有广阔的找矿前景。在以往找矿、勘探、开采的基础上，后续找矿应把重点放在瓦窑沟、回头山、波风岭一带。

(1)瓦窑沟晶质石墨找矿远景区

位于留仙坪石墨矿床的西部，面积约 42.43 km²。区内广泛出露雁岭沟岩组，位于已知矿床含矿层位延伸地段，具有优越的成矿地质条件。

(2)回头山晶质石墨找矿远景区

位于黄柏岔石墨矿床的西部，面积约 28.51 km²。区内广泛出露重要含矿层位雁岭沟岩组，具有优越的成矿地质条件。区内目前已发现晶质石墨矿化点一处，位于庾家河街北部，与庾家河塔尔坪矿段晶质石墨矿处于同一石墨含矿带。此外，工作区南部位于黄柏岔晶质石墨矿床向东延伸的部位，已发现一条小规模

晶质石墨矿体。

(3)波风岭晶质石墨找矿远景区

位于丹凤北部凤县-商南红柱石夕线石墨成矿带的最西段,面积约 21.83 km²。工作区广泛出露丹凤北部最重要含矿层位雁岭沟岩组,具有优越的成矿地质条件。区内在雁岭沟岩组地层中目前已发现晶质石墨矿化体 2 条。

陕西省丹凤北部晶质石墨矿成矿条件优越,资源潜力巨大,初步预测整个成矿区内可探获晶质石墨矿石量 1 000×10⁴ t。

4 结 论

丹凤北部地区晶质石墨矿矿体普遍表现出层控、构造改造及矿石鳞片大的特点,其形成机理为:区域变质+花岗“热穹”叠加变质+构造改造。目前丹凤北部地区石墨矿床勘查程度相对较低,特别是在该成矿带的西段,属于勘查空白区,赋矿地层雁岭沟岩组展布范围大,已发现多处石墨矿化线索,具有广阔的找矿前景。今后石墨矿的勘查重点应放在瓦窑沟、回头山、波风岭一带。

参考文献(References):

- [1] 宫相宽. 丹凤地区秦岭岩群物质组成、形成时代及变质作用研究[D]. 西安: 西北大学, 2017.
Gong X K. Metamorphism, composition and forming age of the Qinling Group in Danfeng area[D]. Xi'an: Northwest University, 2017.
- [2] 杨联涛. 陕西省丹凤北部晶质石墨矿地质特征及成因分析[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2020(1): 34-36, 43.
Yang L T. Geological characteristics and genesis of crystalline graphite deposit in northern Danfeng, Shaanxi Province[J]. China Non-metallic Minerals Industry, 2020(1): 34-36, 43.
- [3] 董云鹏, 张国伟, 朱炳泉. 北秦岭构造属性与元古代构造演化[J]. 地球学报, 2003, 24(1): 3-10.
Dong Y P, Zhang G W, Zhu B Q. Proterozoic tectonics and evolutionary history of the North Qinling Terrane[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2003, 24(1): 3-10.
- [4] 刘国惠, 张寿广, 游振东, 等. 秦岭造山带主要变质岩群及变质演化[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 1-190.
Liu G H, Zhang S G, You Z D, et al. The main metamorphic rock groups and metamorphic evolution in Qinling orogenic belt [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 1-190. (in Chinese)
- [5] 寿立永, 杨联涛, 陈军元, 等. 陕西商洛市沙河子-富庄一带晶质石墨矿地质特征及成矿规律[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2019(S1): 43-49.
Shou L Y, Yang L T, Chen J Y, et al. Geological characteristics and metallogenic regularity of crystalline graphite deposit in Shahezi-Luanzhuang area, Shangluo City, Shaanxi Province[J]. China Non-metallic Minerals Industry, 2019(S1): 43-49.
- [6] 王宗起, 闫全人, 闫臻, 等. 秦岭造山带主要大地构造单元的新划分[J]. 地质学报, 2009, 83(11): 1527-1546.
Wang Z Q, Yan Q R, Yan Z, et al. New division of the main tectonic units of the Qinling Orogenic Belt, Central China[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(11): 1527-1546.
- [7] 游振东, 索书田, 韩郁菁, 等. 造山带核部杂岩变质过程与构造解析——以东秦岭为例[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991: 65.
You Z D, Suo S T, Han Y J, et al. The metamorphic processes and tectonic analyses in the core complex of an orogenic belt: An example from the eastern Qinling Mountains[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1991: 65.
- [8] 张国伟. 秦岭杂岩与秦岭造山带[C]//刘国惠, 张寿广. 秦岭-大巴山地质论文集(一): 变质地质. 北京: 科学技术出版社, 1990: 12.
Zhang G W. Qinling complex and Qinling orogenic belt[C]//Liu G H, Zhang S G. Geological memoirs of the Qinling-Daba Mountains (1): Metamorphic geology. Beijing: Beijing Science and Technology Publishing House, 1990: 12.
- [9] 王涛, 胡能高, 裴先治, 等. 秦岭杂岩的组成、构造格局及演化[J]. 地球学报, 1997, 18(4): 10-16.
Wang T, Hu N G, Pei X Z, et al. The composition, tectonic framework and evolution of Qinling complex, Central China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 1997, 18(4): 10-16.
- [10] 张宗清, 张国伟, 付国民, 等. 秦岭变质地层年龄及其构造意义[J]. 中国科学(D辑), 1996, 26(3): 216-222.
Zhang Z Q, Zhang G W, Fu G M, et al. Age of metamorphic strata in Qinling and its tectonic significance[J]. Science in China (Series D), 1996, 26(3): 216-222. (in Chinese)
- [11] 黄伯钧, Buseck P R. 变质岩中碳质物质的石墨化作用[J]. 矿物学报, 1986, 6(4): 350-353.
Huang B J, Buseck P R. Graphitization of carbonaceous material in metamorphic rocks[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1986, 6(4): 350-353.
- [12] 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, 2000, 16(2): 233-244.
Chen Y J, Liu C Q, Chen H Y, 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, 2000, 16(2): 233-244.
- [13] 陈骏, 王鹤年. 地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 136-139.
Chen J, Wang H N. Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 2004: 136-139. (in Chinese)

- [14]程林, 杨勇, 边敏, 等. 黄陵断穹核部鳞片石墨矿地球化学特征与成因研究[J]. 地质与勘探, 2020, 56(4): 745–758.
- Chen L, Yang Y, Bian M, et al. Geochemical characteristics and genesis of flake graphite ores in the core of the Huangling fault dome, Hubei Province[J]. *Geology and Exploration*, 2020, 56(4): 745–758.
- [15]郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 6–7.
- Zheng Y F, Chen J F. Stable isotopic geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 2004: 6–7. (in Chinese)
- [16]杨联涛. 陕西波风岭石墨矿地质特征及成因[J]. 矿产勘查, 2019, 10(2): 257–263.
- Yang L T. Geological characteristics and genesis of Bofengling crystal graphite deposit in Shangzhou County, Shaanxi[J]. *Mineral Exploration*, 2019, 10(2): 257–263.
- [17]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 Z X, Luo M J, Liu X T, 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.
- [18]胡晗, 张立飞. 俯冲带中石墨质碳的研究进展[J]. 岩石矿物学杂志, 2021, 40(4): 764–777.
- Hu H, Zhang L F. Progress of research on graphitic carbon in subduction zones[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2021, 40(4): 764–777.
- [19]刘丙祥. 北秦岭地体东段岩浆作用与地壳演化[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- Liu B X. Magmatism and crustal evolution in the eastern North Qinling Terrain[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [20]边敏, 程林, 姚敬劬. 区域变质型晶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 M, Cheng L, Yao J Q. Thermodynamics research of graphite forming in regional metamorphic graphite deposits [J]. *Mineral Resources and Geology*, 2018, 32(1): 97–100.
- [21]裴先治, 张维吉, 王涛, 等. 北秦岭造山带的地质特征及其构造演化[J]. 西北地质, 1995, 16(4): 8–12.
- Pei X Z, Zhang W J, Wang T, et al. Geological characteristics and tectonic evolution of north Qinling orogenic belt [J]. *Northwestern Geology*, 1995, 16(4): 8–12.

(上接第 359 页/Continued from Page 359)

- [21]肖克炎, 张晓华, 陈郑辉, 等. 成矿预测中证据权重法与信息量法及其比较[J]. 物探化探计算技术, 1999, 21(3): 223–226.
- Xiao K Y, Zhang X H, Chen Z H, et al. Comparison of method of weights of evidence and information[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 1999, 21(3): 223–226.
- [22]王志旺, 李端有, 王湘桂. 证据权法在滑坡危险度区划研究中的应用[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1268–1273.
- Wang Z W, Li D Y, Wang X G. Zonation of landslide hazards based on weights of evidence model [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(8): 1268–1273.
- [23]地质灾害风险调查评价技术要求(1:50 000)(试行)[S]. 北京: 自然资源部, 2021.
- Technical requirements for geological disaster risk investigation and evaluation (1:50 000) (trial) [S]. Beijing: Ministry of Natural Resources, 2021. (in Chinese)
- [24]潘懋, 李铁锋. 灾害地质学[M]. 2 版. 北京: 北京大学出版社, 2012: 32–45.
- Pan M, Li T F. Disaster geology [M]. 2nd ed. Beijing: Peking University Press, 2012: 32–45. (in Chinese)
- [25]余建英, 何旭宏. 数据统计分析与 SPSS 应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003: 255–257, 379–385.
- Yu J Y, He X H. Statistical analysis and SPSS application [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2003: 255–257, 379–385. (in Chinese)
- [26]汤国安, 杨昕. 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2012: 309–315.
- Tang G A, Yang X. Experimental course on spatial analysis of geographic information systems [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2012: 309–315. (in Chinese)
- [27]胡燕, 李德营, 孟颂颂, 等. 基于证据权法的巴东县城滑坡灾害易发性评价[J]. 地质科技通报, 2020, 39(3): 187–194.
- Hu Y, Li D Y, Meng S S, et al. Landslide susceptibility evaluation in Badong County based on weights of evidence method [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2020, 39(3): 187–194.