2023年8月
August，2023

矿 床 地 质
MINERAL DEPOSITS

第42卷 第4期
42（4）：741~758

文章编号：0258-7106（2023）04-0741-18 **Doi:** 10. 16111/j. 0258-7106. 2023. 04. 004

川北米仓山南缘典型石墨矿床地球化学特征与成因*

段 威[1,2]，唐文春[1**]，刘治成[3]，熊 观[1,2]，黄 健[1,2]，刘晓华[1,2]，陈 翔[1,2]，黄建国[4]

（1 四川省地质矿产勘查开发局化探队，四川 德阳 618000；2 四川省深地地质勘查有限公司，四川 德阳 618000；3 四川省国土科学技术研究院（四川省卫星应用技术中心），四川 成都 610045；4 西南科技大学环境与资源学院，四川 绵阳 621010）

摘 要 文章对比分析了米仓山南缘旺苍-南江石墨矿带东、西2段主要石墨矿床地质及地球化学特征。矿带东段石墨矿体形态以不规则囊状为主，矿石类型以角砾状石墨大理岩型为主，矿体原岩为含有机质碳酸盐岩；矿石的V/Cr、V/(V+Ni)、U/Th平均值分别为0.75、0.42、0.94，稀土元素总量（∑REE）平均84.4 μg/g，δEu平均0.65，矿体原岩沉积于贫氧环境。西段石墨矿体以似层状为主，层控特征明显，矿石类型为石墨片岩型，具钒矿化，原岩以含碳质黏土质、泥砂质碎屑岩为主；矿石的V/Cr、V/(V+Ni)、U/Th平均值分别为3.90、0.79、1.93，稀土元素总量（REE）平均124 μg/g，δEu平均0.59，矿体原岩沉积于贫氧-缺氧环境。石墨矿 $\delta^{13}C$ 值为−16.0‰~−23.0‰，平均−19.1‰，与有机质相近，显著低于大理岩围岩，表明石墨矿碳质来源以有机碳为主。米仓山南缘石墨矿床成因为沉积-变质型，石墨含矿层位经历了晋宁期-澄江期区域变质及热接触变质等多期变质成矿作用，最终形成晶质石墨矿床，其成矿与罗迪尼亚超大陆汇聚-裂解引发的区域变质-岩浆活动有关。

关键词 地球化学；晶质石墨；有机碳；沉积-变质；米仓山

中图分类号：P619.25+2 **文献标志码：**A

Geochemical characteristics and genesis of typical graphite deposits in southern margin of Micang Mountains in northern Sichuan Province

DUAN Wei[1,2], TANG WenChun[1], LIU ZhiCheng[3], XIONG Guan[1,2], HUANG Jian[1,2], LIU XiaoHua[1,2], CHEN Xiang[1,2] and HUANG JianGuo[4]

(1 Geochemistry Exploration Team of Sichuan Bureau of Geology and Minerals Resources, Deyang 618000, Sichuan, China; 2 Sichuan Deep Resource Geological Exploration Co., Ltd., Deyang 618000, Sichuan, China; 3 Sichuan Institute of Land Science and Technology (Sichuan Satellite Application Technology Center), Chengdu 618000, Sichuan, China; 4 College of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China)

Abstract

In this paper, the geological and geochemical characteristics of the graphite deposits in the eastern and western sections of the Wangcang-Nanjiang graphite ore belt in the southern margin of the Micang Mountains were compared and analyzed. In the eastern section of the ore belt, most graphite ore bodies occur in irregular sack-like, the ores are dominated by brecciated graphite marble, and the primary rocks are carbonate rocks containing organic matter. The ores have an average V/Cr value of 0.75, V/(V+Ni) value of 0.42, U/Th value of 0.94, REE value of 84.4 μg/g, and δEu value of 0.65. The primary rocks of the ore bodies are deposited in an oxygen-poor environment. In the western section of the ore belt, most graphite ore bodies are stratified, with obvious strat-

http://www.kcdz.ac.cn/

* 本文得到四川省政府性投资矿产勘查项目（编号：D202103）、四川省自然资源科研项目（编号：KJ-2021-10）和四川省地矿局化探队科技计划项目（编号：HTD202001）联合资助

第一作者简介 段 威，男，1988年生，高级工程师，从事基础地质调查与矿产勘查工作。Email:316463467@qq.com

** 通讯作者 唐文春，男，1965年生，教授级高级工程师，从事矿产勘查与地球化学研究。Email:1649500727@qq.com

收稿日期 2022-09-03；改回日期 2023-06-08。秦思婷编辑。

abound characteristics. The ores are dominated by graphite schist, with vanadium mineralization. The primary rocks are dominated by carbonaceous clay and mud-sandy clastic rocks. The ores have an average V/Cr value of 3.90, V/(V+Ni) value of 0.79, U/Th value of 1.93, REE value of 124 μg/g, and δEu value of 0.59. The primary rocks of the ore bodies are deposited in an oxygen-deficient to oxygen-poor environment. The graphite ores have an δ13C value ranging from −16.0‰ to −23.0‰, with an average of −19.1‰, which is similar to that of organic matter and significantly lower than that of marble host rocks, indicating the carbonaceous matters in graphite ores are mainly sourced from organic carbon. The graphite deposits in the southern margin of the Micang Mountains are of sedimentary-metamorphic type. The graphite ore-bearing horizons had undergone multi-staged metamorphic mineralization in the Jinning-Chengjiang period, such as regional metamorphism and thermal contact metamorphism, and finally crystalline graphite deposits formed. The mineralization is related to the regional metamorphic-magmatic activities triggered by the convergence and breakup of the Rodinia supercontinent.

Key words: geochemistry, crystalline graphite, organic carbon, sedimentary-metamorphism, Micang Mountains

中国石墨成矿地质条件优越，石墨资源丰富，截至2018年，中国查明石墨矿产地211处，资源储量5.37亿t，其中晶质石墨占全国查明石墨资源储量的81.3%，石墨产量、消费量均为世界第一（陈军元等，2020）。石墨矿床按成因主要分为区域变质、接触变质和岩浆热液3种类型（莫如爵等，1989）。区域变质型石墨矿床是中国晶质石墨矿床的主要类型（颜玲亚等，2018），主要与板块汇聚、板块升降过程中的变质作用有关（李超等，2015），多产于克拉通陆块周缘，前寒武纪孔兹岩系对石墨矿具有明显控制作用（刘金中等，1989；马旭东等，2019；杨彪等，2023），如佳木斯地块的鸡西柳毛和萝北云山等石墨矿床（杨培奇等，2017；刘彦林，2019）；华北克拉通孔兹岩带内蒙古兴和、扎木敖包（王时麒，1989；梁帅，2015；颜玲亚等，2018），胶辽吉带的山东南墅，河南背孜、鲁山及灵宝等石墨矿床（于吉林等，2012；Feng et al., 2015；李超等，2015）；扬子地台西-北缘中坝、尖山及三岔垭等石墨矿床（夏锦胜等，2017b；2019；易承生，2019）。接触变质型石墨矿床常见于活动大陆边缘，多与燕山期中酸性岩浆活动有关，如湖南鲁塘石墨矿床等（安江华等，2016）。岩浆热液型石墨矿床主要为同化混染含有机质围岩，有机质发生变质而形成石墨矿床（李超等，2015），如新疆苏吉泉、黄羊山等石墨矿床（刘松柏等，2011；白建科等，2017；2018）。

中国西南分布川北米仓山南缘旺苍-南江石墨成矿带及川南康滇隆起攀枝花-西昌石墨成矿带（马源等，2019）2条，具有良好的找矿潜力，但总体研究程度较低，特别是对石墨成矿带的综合研究程度不够，极大制约了石墨找矿及勘查工作。在川北米仓山南缘的中-新元古界火地垭群（褶皱基底）变质岩系，陆续发现了坪河、庙坪、尖山、大河坝等中大型晶质石墨矿床，是中国西南重要的晶质石墨成矿带之一（颜玲亚等，2018）。前人对川北米仓山南缘部分矿床的矿床地质特征、地球化学特征及成矿碳质来源进行了研究（王红军等，2017；夏锦胜等，2017a；2017b；马志鑫等，2018；高瑞祥等，2019；邓绍军等，2020），但缺乏对于整个石墨矿带主要石墨矿床的地质、地球化学特征对比分析研究，对成矿带的石墨成矿规律研究较少。本文对米仓山南缘石墨成矿带典型石墨矿床进行了较系统的矿床地质特征对比，并开展了石墨矿岩石地球化学和C同位素地球化学分析，综合探讨了该区域石墨矿的形成环境、成矿物质来源及矿床成因，为进一步开展找矿工作提供依据。

1 区域地质背景

研究区所处的米仓山构造带位于扬子地台西北缘，北邻秦岭造山带，西为龙门山造山带，东为大巴山冲断带，南为四川盆地（图1a）。米仓山构造带由前寒武纪基底及沉积盖层构成。盖层围绕基底隆起周缘出露，由震旦系—三叠系海相碳酸盐岩-碎屑岩系组成。前寒武纪基底具备双层结构：下部为新太古代—古元古代角闪岩相变质杂岩构成的结晶基底（何大伦等，1995；何政伟等，1996；1997a）；上部为火地垭群绿片岩相变质岩构成的褶皱基底，包括上两组变质碎屑岩-火山岩组合及麻窝子组变质碎屑岩-

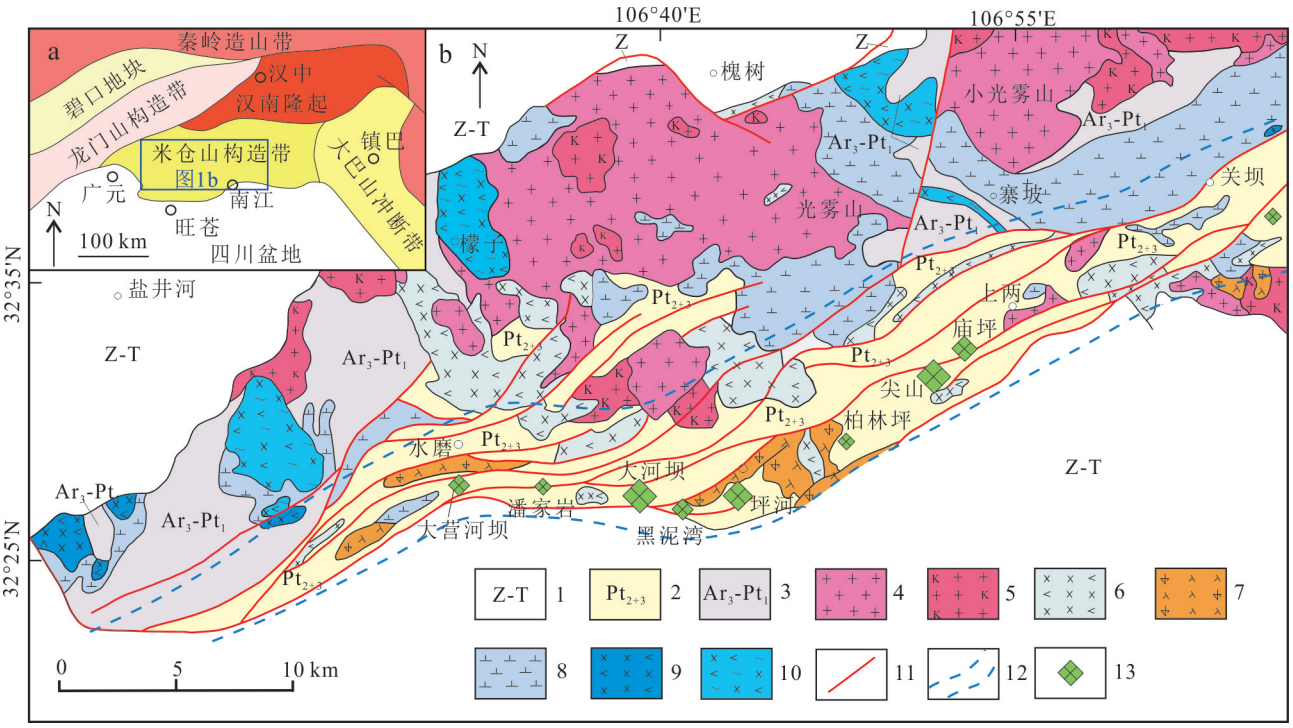

图1　研究区大地构造位置图(a)和川北米仓山地区区域地质简图(b,修改自何正伟等,1997a)

1—震旦系—三叠系;2—中-新元古界变质基底;3—新太古界—古元古界结晶基底;4—澄江期酸性侵入岩;5—澄江期中酸性-酸性侵入岩;6—澄江期超基性-基性侵入岩;7—晋宁期超基性-碱性侵入岩;8—晋宁期中酸性侵入岩;9—晋宁期超基性-基性侵入岩;10—吕梁期基性-中性侵入岩;11—断层;12—旺苍-南江石墨矿带;13—石墨矿床

Fig.1　Tectonic location map of the study area(a) and geological sketch map of the Micang Mountains area in the North of Sichuan Province(b, modified from He et al., 1997a)

1—Sinian—Triassic; 2—Meso-Neoproterozoic metamorphic basement; 3—Neoarchean—Paleoproterozoic crystalline basement; 4—Chengjiangian acid intrusive rocks; 5—Chengjiangian intermediate-acid intrusive rocks; 6—Chengjiangian ultrabasic-basic intrusive rocks; 7—Jinningian ultrabasic-alkaline intrusive rocks; 8—Jinningian intermediate acid intrusive rock; 9—Jinningian ultrabasic-basic intrusive rocks; 10—Luliangian basic-intermediate intrusive rocks; 11—Fault; 12—Wangcang-Nanjiang graphite ore belt; 13—Graphite deposit

碳酸盐岩组合。区域岩浆岩以侵入岩为主,多呈岩基、岩株、岩脉侵入于基底变质岩系,侵入岩大致可分为3个主要侵入期次:第一期为前吕梁及吕梁期超基性-中基性岩及碱性超基性岩类;第二期为晋宁期中-中酸性岩类及碱性岩类;第三期为澄江中-酸性岩类。基底隆起南缘发育大量倾向北北西的高角度脆韧性逆冲断裂,这些断层在新元古代已初步形成,燕山期—喜山期基底隆起和向南推覆过程中进一步继承发展,将火地垭群切割成北东展布的断片(图1b)(吴磊等,2011)。

2　旺苍-南江石墨成矿带矿床特征

米仓山南缘的中-新元古界变质岩系中,自西向东发现了大营河坝(中型)、大河坝(大型)、黑泥湾(小型)、坪河(中型)、尖山(大型)、庙坪(中型)等石墨矿床及大量石墨矿(化)点,形成了1条北东东走向、长约50 km、宽约5 km的石墨成矿带。矿带西段坪河、大河坝等石墨矿床的矿体具有较明显的层控特征,矿床固定碳平均品位为15%,矿石类型以石墨片岩型为主;矿带东段的尖山、庙坪等矿床(点)的矿体以不规则囊状、透镜状为主,矿床固定碳平均品位一般在8%以下,矿石类型以石墨角砾岩型为主。主要石墨矿床(点)特征见表1。

2.1　大河坝石墨矿床

矿区主要出露中-新元古界火地垭群麻窝子组($Pt_{2+3}m$),并有新元古代中酸性-酸性岩体侵入其中(图2a),大河坝花岗岩锆石LA-ICP-MS U-Pb谐和年龄为(852.77±4.85)Ma(另文刊出)。麻窝子组二段($Pt_{2+3}m^2$)是矿区主要的赋矿地层。其中,上部厚层

http://www.kcdz.ac.cn/

表1 旺苍-南江石墨矿带典型石墨矿床特征表

Table 1 The characteristics of the typical graphite deposits in Wangcang-Nanjiang graphite ore belt

矿带	典型矿床(点)	规模	赋矿地层及部位	矿体形态	矿石类型	固定碳品位/%	主要差异
矿带西段	大营河坝	中型	$Pt_{2+3}m^2$中上部,近闪长岩体	似层状、透镜状	石墨片岩型	平均16.5	品位较高,矿石类型为石墨片岩型,层位控矿
	黑泥湾	小型	$Pt_{2+3}m^2$中上部	透镜状	石墨片岩型	6.64~14.4	
	潘家岩	矿点	$Pt_{2+3}m^2$中上部	透镜状	石墨片岩型	20.0	
	大河坝	大型	$Pt_{2+3}m^2$中上部,近花岗岩体	似层状	石墨片岩型	平均14.4	
	坪河	中型	$Pt_{2+3}m^2$中上部,近霓霞岩体	不规则似层状	石墨片岩型	平均13.5	
矿带东段	尖山	大型	$Pt_{2+3}m^2$构造角砾岩带,近闪长岩体	不规则囊柱状	石墨角砾岩型	平均7.89	品位相对较低,矿石类型以石墨角砾岩型为主,层位-构造控矿
	庙坪	中型	$Pt_{2+3}m^2$构造角砾岩、片岩带,近闪长岩体	不规则似层状、透镜状	石墨大理岩型	平均4.48	
	柏林坪	矿点	$Pt_{2+3}m^2$构造角砾岩、片岩带,近霓霞岩体	不规则透镜状、囊状	石墨大理岩型	7.00	

注:$Pt_{2+3}m^2$为中-新元古界火地垭群麻窝子组二段。

状透闪石白云石大理岩中见多个似层状、透镜状云母石英石墨片岩层(矿化层)。

主矿体长度约3000 m,矿体厚度5.0~76.0 m,平均23.0 m;固定碳品位11.8%~33.5%,平均13%。伴生$w(V_2O_5)$一般0.18%~1.28%。矿体呈似层状,总体倾向北,倾角55°~70°,产状与围岩产状基本一致,具明显的层控特征。近岩体矿体固定碳品位明显高于远离岩体的矿体。矿石岩性以石墨片岩为主,粒状变晶结构,片状和稠密浸染构造,主要矿物为石英、石墨、长石、绢云母、白云母,少量绿泥石和黄铁矿,石墨呈条带状集合体分布或分散状分布(图3a~c),石墨鳞片大小一般0.005~0.250 mm。

2.2 坪河石墨矿床

矿区地层主要为中-新元古界火地垭群麻窝子组二段($Pt_{2+3}m^2$),岩浆岩以碱性正长岩和霓霞岩岩株、岩盘或岩脉为主,坪河霓霞岩体锆石LA-ICP-MS U-Pb谐和年龄为(855.84±4.55)Ma(另文刊出),矿区北西、南东侧发育有压性断裂。石墨矿体赋存于麻窝子组二段($Pt_{2+3}m^2$)中上部白云质透闪石大理岩内的云母石英石墨片岩层。含矿云母石英石墨片岩层长约2200 m,宽150~400 m,内含多个石墨矿体,呈不规则的层状、似层状、透镜状,矿体具层控特征,与围岩产状总体一致(图2b)。

主矿体走向为北东-南西向,倾角为60°~80°,矿体出露长度达数百米,厚约10.0~30.0 m;矿石固定碳品位4.58%~19.80%,平均13.5%;伴生$w(V_2O_5)$为0.38%~1.08%,平均为0.58%。石墨矿石类型以石墨片岩型为主,主要矿物为石英、石墨、长石、绢云母、白云母、绿泥石、黄铁矿(图3d),石墨呈鳞片大小,一般为0.07~0.68 mm,平均0.24 mm(图3e、f)。

2.3 尖山石墨矿床

矿区主要出露中-新元古界麻窝子组二段及三段,石英闪长岩和花岗岩呈岩株状或岩枝状侵入于其中(未获得岩体可靠年龄)。石墨矿体主要赋存于麻窝子组二段($Pt_{2+3}m^2$)角砾岩带中(图2c)。石墨矿体与围岩界线不明显,石墨主要充填于胶结物、大理岩角砾间及岩石裂隙中,大部分矿石中的角砾不具石墨化(图3g)。

矿体呈不规则囊状,近东西走向,倾向北北西,主矿体厚8.82~216 m,平均厚度79.40 m;固定碳品位3.46%~12.80%,平均7.82%,矿体内部不连续夹石较多。矿石类型以石墨角砾岩为主,粒状变晶结构,角砾状和稠密浸染状构造,部分为稀疏浸染状构造,主要矿物为白云石、石墨、方解石及少量石英、黄铁矿,石墨以不规则集合体和分散状分布,石墨鳞片大小一般0.005~0.200 mm(图3h、i)。尖山石墨矿不具钒矿化,$w(V_2O_5)$一般小于0.05%。

2.4 含矿地层变质作用

研究区中-新元古界火地垭群麻窝子组地层为一套变质碎屑岩-碳酸盐岩夹火山岩,岩性以大理岩、黑云母石英千枚岩、绢云母石英片岩及黑云母板岩等为主。含矿层位多靠近晋宁期—澄江期侵入岩体,并常见花岗岩脉、闪长岩脉及正长岩脉侵入至矿体及顶底板围岩中(图4a~c)。矿体围岩可见石英透闪石角岩-透闪石角岩-透闪石大理岩-滑石片岩等热接触变质带。

石英透闪石角岩主要分布于矿体附近约50 m内呈带状分布。该类蚀变岩中残留的方解石、白云石较少,交代形成的石英团块状不均匀分布于岩石中(图4d),局部形成石英岩,透闪石呈纤维状带状集

http://www.kcdz.ac.cn

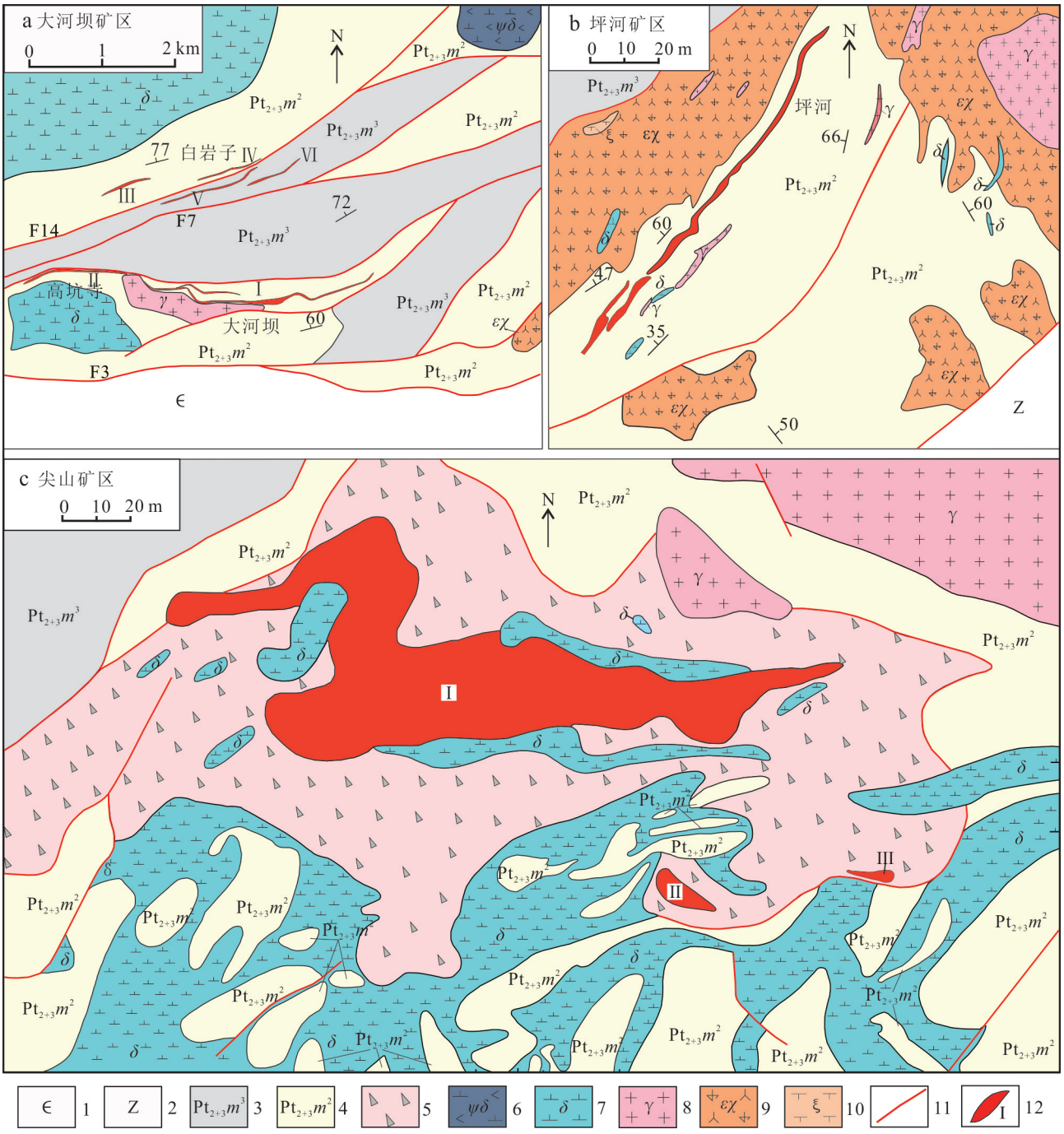

图2　大河坝石墨矿床地质简图(a,修改自段威等,2020)、坪河石墨矿床地质简图(b,修改自邓绍军等,2020)和尖山石墨矿床地质简图(c,修改自高显忠等,2015)

1—寒武系;2—震旦系;3—中-新元古界麻窝子组三段;4—中-新元古界麻窝子组二段;5—角砾岩带;6—角闪闪长岩;7—闪长岩;8—花岗岩;9—霓霞岩;10—正长岩;11—断层;12—石墨矿体及编号

Fig.2　Geological sketch map of the Daheba graphite deposit (a, modified from Duan et al.,2020), geological sketch map of the Pinghe graphite deposit(b, modified from Deng et al.,2020) and geological sketch map of the Jianshan graphite deposit(c, modified from Gao et al.,2015)

1—Cambrian; 2—Sinian; 3—Meso-Neoproterozoic Third Member of the Mawozi Formation; 4—Meso-Neoproterozoic Second Member of Mawozi Formation; 5—Breccia zone; 6—Amphibole diorite; 7—Diorite; 8—Granite; 9—Nepheline; 10—Syenite; 11—Fault; 12—Graphite ore body and its number

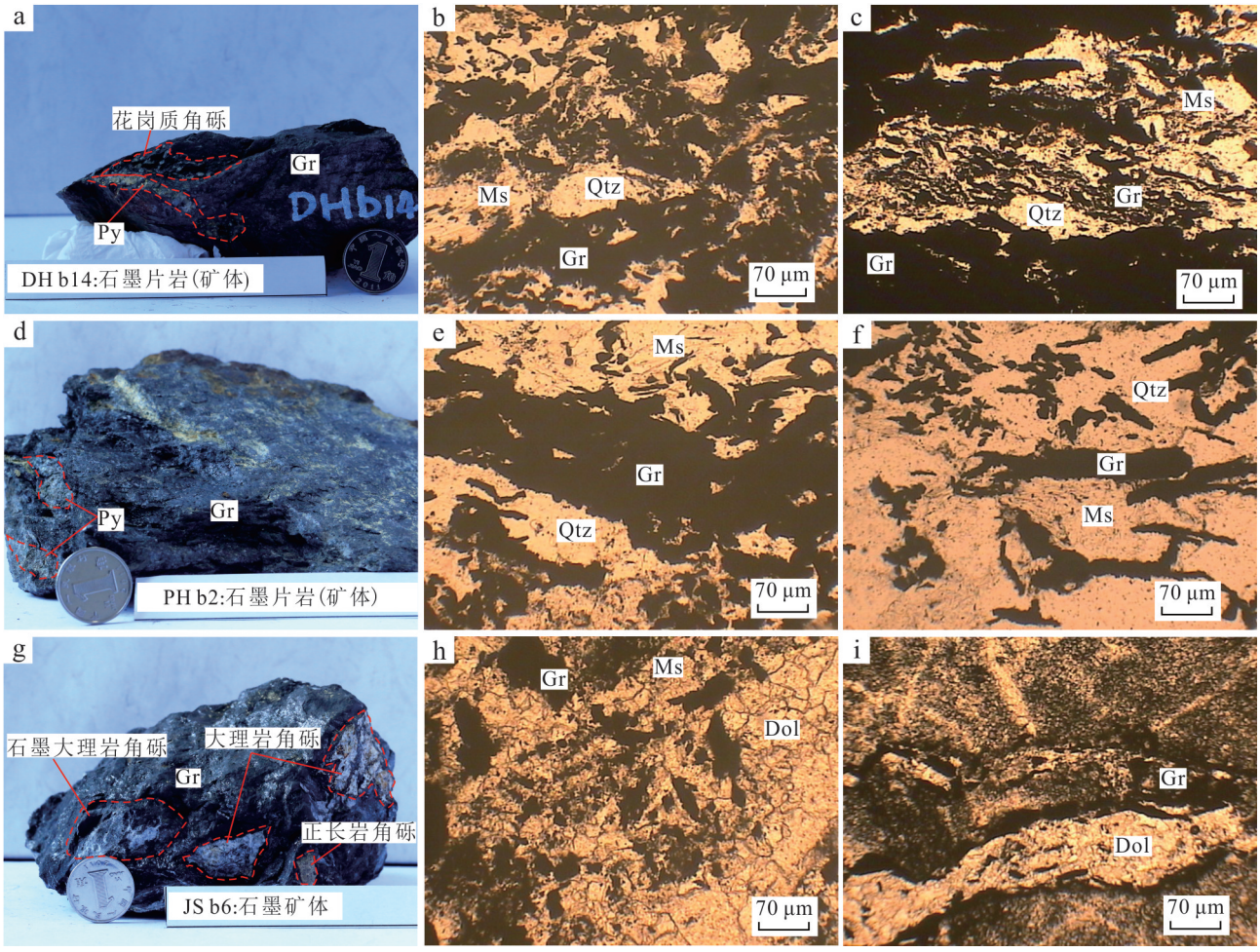

图3 旺苍-南江石墨矿带石墨矿石标本及镜下照片

a~c. 大河坝石墨矿床手标本照片及镜下(单偏光)照片;d~f. 坪河石墨矿床手标本照片及镜下(单偏光)照片;g~i. 尖山石墨矿床手标本照片及镜下(单偏光)照片

Dol—白云石;Gr—石墨;Cal—方解石;Qtz—石英;Ms—白云母;Py—黄铁矿

Fig.3 Hand specimens and microphotographs of graphite ores in Wangcang-Nanjiang graphite ore belt

a~c. Hand specimens and microphotographs (single polarized) of graphite ores from the Daheba graphite deposit; d~f. Hand specimens and microphotographs (single polarized) of graphite ores from the Pinghe graphite deposit; g~i. Hand specimens and microphotographs (single polarized) of graphite ores from the Jianshan graphite deposit

Dol—Dolomite; Gr—Graphite; Cal—Calcite; Qtz—Quartz; Ms—Muscovite; Py—Pyrite

http://www.kcdz.ac.

合体定向分布(图4d、e)。该类岩石中还可见透辉石呈单体或团块状集合体不均匀分布,部分与透闪石嵌布成集合体(图4f)。

透闪石角岩分布于矿体外约0~100 m,透闪石多为纤维状呈集合体定向分布,集合体呈放射状、束状交织结构,含量达70%~90%(图4g、h)。部分岩石中可见阳起石呈条带状、团块状集合体分布,局部与透闪石呈交织结构(图4i)。

透闪石大理岩、滑石片岩主要分布于距矿体50~100 m处。滑石片岩呈透镜状分布,滑石含量约30%~60%,呈鳞片状,片理发育,揉皱明显(图4j)。

另外,石墨云母石英片岩中还可见少量含钒铁金红石、含钒榍石,能谱分析显示 w(V)为0.91%~2.29%,他形-半自形粒状,与石墨呈半规则联生(图4k、l)。

上述特征表明,石墨含矿层位除绿片岩相区域变质外,靠近侵入岩体区域还叠加了较强烈的热接触变质及热液蚀变,并在接触带局部发生了边缘混合岩化变质作用,这些叠加的后期变质为浅变质麻窝子组内的石墨进一步富集、鳞片变大提供了有利条件。

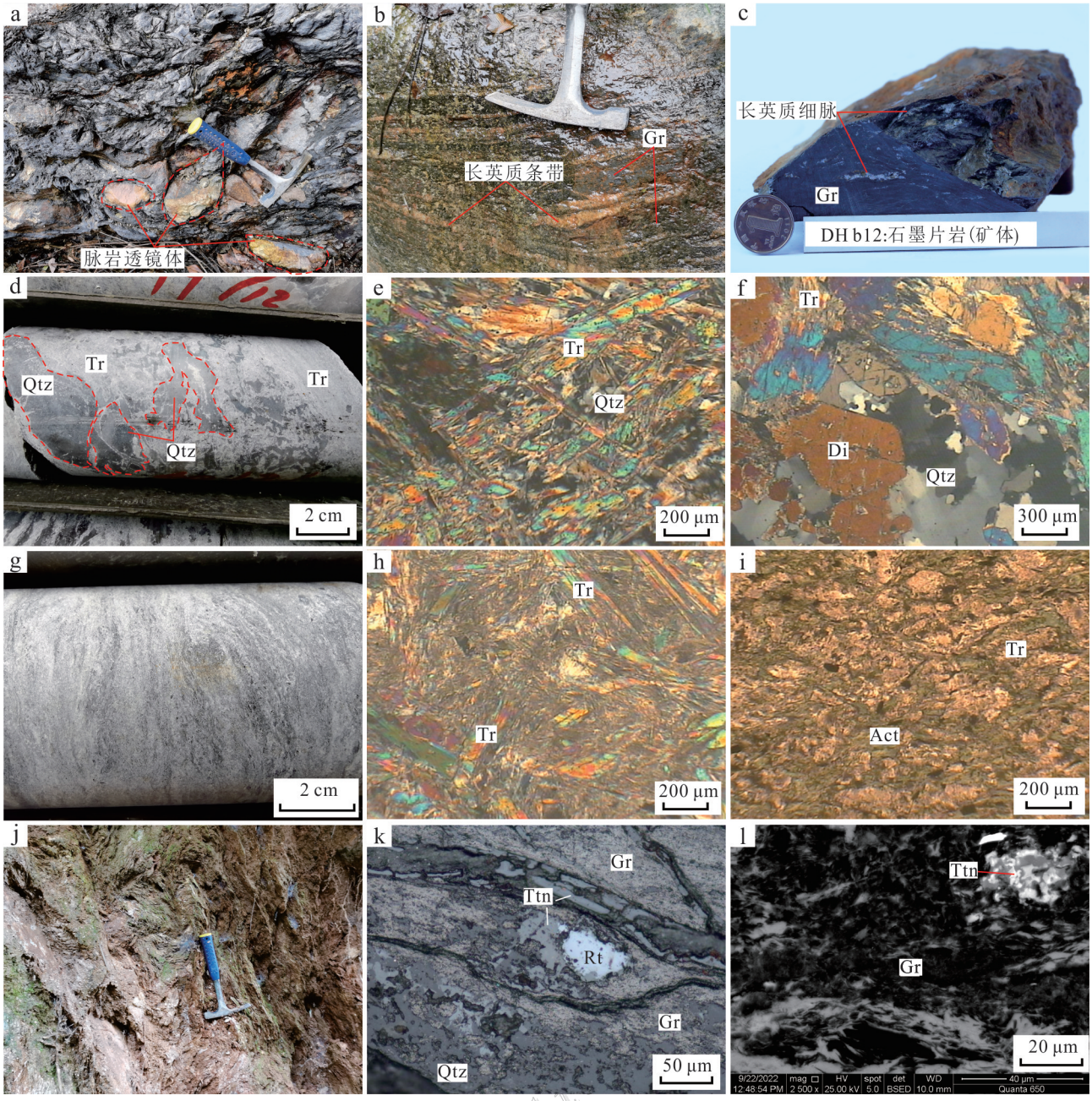

图4　旺苍-南江石墨矿带含矿地层岩、矿石特征及其镜下照片

a. 石墨矿体中受挤压的花岗质脉岩;b. 石墨矿体中的长英质条带;c. 石墨矿石内的长英质细脉;d. 钻孔岩芯中的石英透闪石角岩;e、f. 石英透闪石角岩镜下石英、透闪石、透辉石嵌布特征(正交偏光);g. 钻孔岩芯中的透闪石角岩;h、i. 透闪石角岩镜下阳起石、透闪石嵌布特征(正交偏光);j. 蚀变带中的滑石片岩;k. 石墨矿石中的金红石、榍石嵌布特征(反射光);l. 石墨矿石中的榍石(BSE图像)

Act—阳起石;Di—透辉石;Gr—石墨;Qtz—石英;Rt—金红石;Tr—透闪石;Ttn—榍石

Fig.4　Characteristics and microscopic photographs of ore-bearing strata rocks and ores in Wangcang-Nanjiang graphite ore belt

a. Extruded granitic dikes in graphite ore body; b. Felsic bands in graphite ore body; c. Felsic veinlets in graphite ore; d. Quartz tremolite hornfels in drill core; e, f. Dissemination characteristics of quartz, tremolite and diopside in quartz tremolite hornfels(cross-polarized light); g. Tremolite hornfels in drill core; h, i. Dissemination characteristics of actinolite and tremolite in tremolite hornfels(cross-polarized light); j. Talc schist in altered zone; k. Dissemination characteristics of rutile and titanite in graphite ore(reflected light); l. Titanite in graphite ore(BSE image)

Act—Actinolite; Di—Diopside; Gr—Graphite; Qtz—Quartz; Rt—Rutile; Tr—Tremolite; Ttn—Titanite

3 采样及分析测试

样品采自大河坝、尖山、坪河及大营河坝等典型石墨矿床主矿体。本次主量、微量、稀土元素分析测试在四川省地矿局化探队测试中心完成，岩石主量元素数据是采用X-射线荧光光谱法、容量法和重量法来测定；微量元素和稀土元素采用等离子体质谱法（ICP-MS）测定。

碳同位素样品分析测试由核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成，测试方法为：将矿石样品（粉样）经提纯、干燥等前处理后，用洁净银杯或锡杯包裹，自动进样器进样，样品在960℃的反应器中，有机物与O_2迅速反应，生成CO_2气体，在90 mL/min的He气流带动下，经过干燥剂除水和色谱柱分离，CO_2气体通过石英毛细管进入MAT253质谱进行分析。碳同位素测量结果分别以PDB为标准，记为$\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$，分析精度优于±0.1‰。工作标准为国际原子能机构标准物质IAEA-600，其$\delta^{13}C$同位素组成为$\delta^{13}C$=−27.771‰±0.043‰。

4 测试结果

4.1 主量元素

研究区的石墨矿石化学成分差异较大（表3），从矿床空间分布位置看，石墨矿带东、西两端石墨矿床化学成分存在明显差异：

矿带东段尖山、庙坪等石墨矿床低SiO_2、Al_2O_3、K_2O，高CaO、MgO特征：$w(SiO_2)$为3.94%~14.1%，$w(Al_2O_3)$为0.65%~2.43%，$w(MgO)$为15.5%~17.1%，$w(CaO)$为23.4%~25.8%；矿石未见钒富集，$w(V_2O_5)$为0.006%~0.010%。

矿带西段大河坝、坪河等矿床具高SiO_2、Al_2O_3、K_2O，低CaO、MgO特征：$w(SiO_2)$为42.1%~60.6%，$w(Al_2O_3)$为8.02%~16.9%，$w(MgO)$为0.51%~1.72%，$w(CaO)$为0.07%~0.43%；钒强烈富集，$w(V_2O_5)$为0.03%~0.81%（平均0.4%），达到伴生钒品位。

4.2 微量元素

矿石原始地幔标准化蛛网图（图5）总体上曲线略向右倾，石墨矿带东、西两段的石墨矿床表现出不同的矿石微量元素特征。

矿带东段石墨矿床富集Sr、Ba、Rb、K等大离子亲石元素，矿石Rb/Sr比值0.05~0.08（平均0.07），低于陆壳平均值（0.24，Taylor et al., 1985）；Zr、Hf、Th、U等高场强元素高于原始地幔值，总体与同层位碳酸盐岩围岩含量相似（段威等，2021），表明矿体原岩与围岩可能具有相似的物源或岩性。

矿带西段石墨矿床相对富集Ba、Rb、K等大离子亲石元素，Sr元素明显亏损，导致矿石Rb/Sr比值较高，为0.92~5.49（平均2.86），Sr/Ba比值0.03~0.26（平均0.11），反映近海陆源物源和副变质岩特征（蔡文春等，2020）。矿带西段石墨矿床Zr、Hf、Th、U、Nb等高场强元素含量是围岩的数十倍（段威等，2021），反映成矿物质与围岩可能不相关。另外，矿带西段各石墨矿床均存在V元素强烈富集的现象，V/Cr比值0.18~6.54（平均3.6），V/（V+Ni）比值0.15~0.87（平均0.73）。

4.3 稀土元素

据表3可知，研究区石墨矿床稀土元素总量（∑REE）偏低，矿带东段∑REE为$(46.8\sim233.0)\times10^{-6}$（平均$124\times10^{-6}$）、西段∑REE为$(71.6\sim98.0)\times10^{-6}$（平均$84.4\times10^{-6}$），均低于上地壳∑REE平均值$146\times10^{-6}$（Taylor et al.，1986）。

矿带东、西两段石墨矿床LREE/HREE值分别为4.16~5.73（平均4.89）和4.36~16.40（平均8.62），轻稀土元素相对富集；$(La/Yb)_N$值分别为4.32~6.11（平均5.04）和2.88~13.50（平均6.79），轻、重稀土元素分异较强烈，稀土元素配分曲线右倾（图6）。矿带东、西两段石墨矿床δCe分别为0.79~1.01（平均0.87）和0.85~1.03（平均0.94）；δEu分别为0.61~0.68（平均0.65）和0.49~0.66（平均0.59），负铕异常明显。

5 讨 论

5.1 矿体原岩

研究区各石墨矿床的矿石特征存在不同，大河坝、坪河等矿床矿石具碎屑岩变质矿物组合，尖山、庙坪等矿床石墨矿石具碳酸盐岩特征。这些矿床均经历了复杂的变形及变质作用，化学成分也存在较明显的不同，要恢复其原岩构造环境，还需借助原岩恢复的相关地球化学图解来进行综合研究。根据矿石化学成分在Zr/TiO_2-Ni图解（王仁民等，1986）及K-A图解（周世泰，1981；1984）的投图结果显示，样品全部落入沉积岩区（图7，图8），其中，矿带西段的石墨矿石样品均落入泥质粉砂质岩亚区，而矿带东段石墨矿石样品则全部落入碳酸盐岩

http://www.kcdz.ac.cn

表 3　旺苍-南江石墨矿带典型石墨矿床矿石主量元素(w(B)/%)及微量稀土元素含量表(w(B)/10^{-6})

Table 3　The analytical of major elements(w(B)/%) and trace element(w(B)/10^{-6}) compositions of graphite ores from typical graphite deposits in Wangcang-Nanjiang graphite ore belt

组分	矿带西段(石墨片岩型)大营河坝		矿带西段(石墨片岩型)大河坝				矿带西段(石墨片岩型)坪河			矿带东段(石墨角砾岩型)尖山				矿带东段(石墨角砾岩型)庙坪
	DY1	DY2	DH1	DH2	DH3	DH4	PH1	PH2	PH3	JS1	JS2	JS3	JS4	MP*
SiO_2	60.6	58.3	45.6	55.1	42.1	52.1	52.2	52.6	59.2	8.79	7.70	10.2	14.1	8.74
Al_2O_3	14.4	15.0	16.9	10.5	13.5	8.02	14.8	11.2	10.5	0.65	1.04	0.96	0.99	2.43
Fe_2O_3	0.99	0.85	2.27	0.10	2.71	12.2	3.73	2.76	0.65	0.56	0.60	0.49	0.47	1.80
FeO	1.09	1.19	0.40	1.13	0.75	0.45	0.32	0.20	0.10	0.11	0.10	0.14	0.14	0.72
TiO_2	0.65	0.77	1.22	1.20	1.34	0.71	1.47	1.34	1.30	0.09	0.12	0.11	0.10	0.15
CaO	0.43	0.40	0.12	0.07	0.16	0.03	0.23	0.11	0.17	25.8	25.6	24.8	23.4	23.8
MgO	1.31	1.36	1.15	0.63	1.42	0.51	1.40	1.19	1.04	17.1	17.0	16.4	15.5	16.2
K_2O	3.51	4.19	6.79	2.21	2.96	2.62	4.64	4.42	4.67	0.30	0.32	0.28	0.29	0.70
Na_2O	1.97	1.39	0.86	0.10	0.07	0.08	0.30	0.07	0.07	0.03	0.043	0.02	0.04	0.05
P_2O_5	0.37	0.40	0.08	0.05	0.14	0.23	0.08	0.09	0.03	0.45	0.71	0.87	0.98	0.94
V_2O_5	0.69	0.81	0.49	0.51	0.47	0.34	0.37	0.23	0.22	0.01	0.01	0.01	0.01	0.006
烧失量	13.4	14.8	23.5	27.7	34.0	23.6	20.0	25.5	21.7	45.5	46.3	45.8	43.4	/
总和	99.4	99.5	99.4	99.3	99.6	100.9	99.5	99.7	99.7	99.4	99.5	100.1	99.4	/
固定碳	6.18	7.97	17.8	22.5	28.0	19.6	14.6	22.3	17.7	4.22	7.46	6.73	6.72	7.27
SiO_2/Al_2O_3	4.19	3.88	2.70	5.24	3.12	6.49	3.53	4.72	5.62	13.6	7.41	10.6	14.3	3.59
K_2O/Na_2O	1.78	3.02	7.91	22.1	40.0	34.9	15.3	68.1	71.8	9.03	7.33	13.8	6.77	14.0
MgO/CaO	3.04	3.39	9.58	8.83	8.67	14.94	6.10	11.02	6.04	0.66	0.66	0.66	0.66	0.68
Rb	121	143	151	97.6	123	90.1	115	79.2	83.0	9.26	10.3	10.3	11.3	
Sr	132	110	75.6	31.8	23.2	16.4	69.9	16.3	58.2	191	121	144	179	
Ba	561	687	1590	1133	1377	441	425	278	227	93.6	147	117	130	
U	51.7	40.0	18.5	18.8	16.5	6.48	23.1	28.2	12.0	2.28	2.87	3.14	3.16	
Th	9.15	12.5	19.2	20.3	17.1	9.11	12.1	13.8	11.5	2.57	2.30	2.17	5.04	
Co	11.4	9.98	7.45	5.02	7.15	5.60	2.67	0.55	2.59	1.34	1.50	1.19	1.15	
Ni	41.9	36.4	95.2	79.0	111	32.2	93.7	36.2	7.66	19.8	27.0	24.9	23.3	
V	3865	4262	2770	2872	2511	1883	2074	1304	1219	29.7	34.8	34.9	30.4	
Cr	908	1138	670	901	1183	527	317	410	277	42.5	59.2	57.8	51.6	
Nb	8.35	9.93	25.0	15.2	15.5	6.39	11.4	12.0	11.2	1.10	0.76	0.48	1.06	
Ga	20.2	22.9	18.7	20.3	22.1	14.4	20.4	20.3	18.7	1.14	1.13	1.18	1.63	
Ta	1.01	1.10	2.39	1.21	1.07	0.77	1.32	0.93	1.03	0.50	0.09	0.09	0.17	
Sc	9.74	8.41	9.63	12.4	13.3	10.6	13.3	13.5	9.69	9.82	3.67	2.32	2.24	
Zr	200	237	338	260	246	160	203	236	233	17.3	19.7	19.8	20.3	
Hf	11.1	12.8	11.9	8.58	8.31	5.91	11.2	10.7	10.7	0.91	0.63	0.72	1.10	
W	1.91	2.50	8.21	16.4	30.3	7.28	2.87	1.39	0.59	0.46	0.44	0.45	0.42	
Mo	38.3	45.9	25.6	34.9	46.3	133	95.0	89.2	44.0	1.39	1.49	1.70	1.76	
Y	14.0	12.0	16.7	21.1	22.1	12.8	17.7	17.9	15.6	33.3	40.7	40.1	40.3	
Rb/Sr	0.92	1.30	2.00	3.07	5.31	5.49	1.64	4.85	1.43	0.05	0.08	0.07	0.06	
Sr/Ba	0.23	0.16	0.05	0.03	0.02	0.04	0.16	0.06	0.26	2.04	0.83	1.24	1.37	
U/Th	5.65	3.19	0.96	0.93	0.96	0.71	1.91	2.05	1.04	0.89	1.25	1.45	0.63	
V/Cr	4.26	3.74	4.13	3.19	2.12	3.57	6.54	3.18	4.40	0.70	0.59	0.60	0.59	
V/(V+Ni)	0.81	0.79	0.81	0.76	0.68	0.78	0.87	0.76	0.81	0.41	0.37	0.38	0.37	

http://www.kcdz.ac.cn/

续表 3

Continued Table 3

组分	矿带西段(石墨片岩型) 大营河坝		矿带西段(石墨片岩型) 大河坝				矿带西段(石墨片岩型) 坪河			矿带东段(石墨角砾岩型) 尖山			
	DY1	DY2	DH1	DH2	DH3	DH4	PH1	PH2	PH3	JS1	JS2	JS3	JS4
La	17.4	19.3	18.6	20.0	21.5	7.40	22.4	29.2	49.8	18.3	16.6	13.0	13.5
Ce	43.4	46.4	39.4	41.9	46.3	15.6	49.7	60.4	100	34.4	37.0	22.5	23.4
Pr	5.93	6.40	5.80	6.49	6.58	2.62	6.68	8.2	13.2	4.46	4.58	3.41	3.58
Nd	23.5	25.0	22.5	25.5	25.9	9.97	25.1	31.1	48.6	18.2	19.3	15.0	15.7
Sm	4.80	4.97	4.13	4.85	5.35	2.05	4.32	5.16	7.09	3.77	3.98	3.11	3.22
Eu	0.94	0.93	0.64	0.72	0.88	0.43	0.81	0.92	1.14	0.87	0.92	0.68	0.74
Gd	3.76	3.78	3.31	3.93	4.51	1.90	3.29	3.80	4.57	3.97	4.38	3.71	3.78
Tb	0.49	0.48	0.50	0.62	0.68	0.34	0.47	0.50	0.48	0.60	0.65	0.55	0.56
Dy	2.63	2.41	3.29	4.11	4.17	2.17	3.04	3.08	2.65	3.78	4.22	3.75	3.71
Ho	0.45	0.40	0.65	0.82	0.81	0.45	0.62	0.62	0.53	0.73	0.84	0.77	0.75
Er	1.35	1.24	2.23	2.91	2.75	1.60	2.19	2.22	1.97	2.26	2.63	2.42	2.37
Tm	0.20	0.18	0.35	0.45	0.43	0.26	0.35	0.35	0.32	0.30	0.35	0.32	0.31
Yb	1.49	1.38	2.63	3.23	3.16	1.73	2.41	2.58	2.48	2.02	2.22	2.03	1.94
Lu	0.27	0.24	0.40	0.51	0.50	0.29	0.39	0.42	0.42	0.29	0.34	0.31	0.29
ΣREE	107	113	104	116	124	46.8	122	149	233	94.0	98.0	71.6	73.9
LREE/HREE	9.02	10.2	6.82	6.00	6.26	4.36	8.54	9.95	16.4	5.73	5.27	4.16	4.39
δEu	0.65	0.63	0.51	0.49	0.53	0.66	0.63	0.61	0.57	0.68	0.67	0.61	0.65
δCe	1.03	1.00	0.91	0.88	0.93	0.85	0.97	0.93	0.92	0.89	1.01	0.80	0.79
$(La/Yb)_N$	7.87	9.43	4.77	4.17	4.59	2.88	6.27	7.63	13.54	6.11	5.04	4.32	4.69

注:比值单位为1;MP*分析数据引用自王红军等,2015。

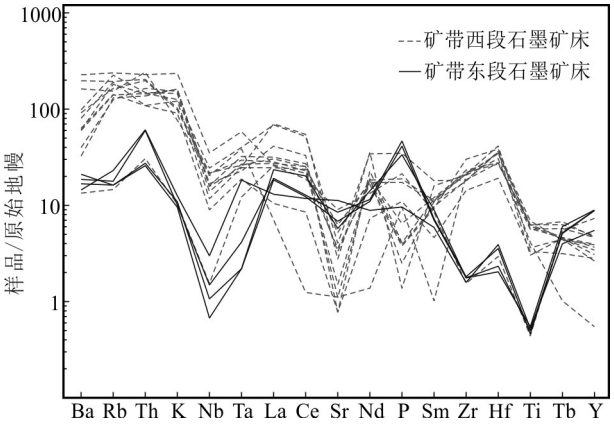

图5 旺苍-南江石墨矿带矿石原始地幔标准化蛛网图(原始地幔标准值据McDonough et al., 1991)

Fig.5 Primitive mantle-normalized trace element spider diagrams of graphite ores from Wangcang-Nanjiang graphite ore belt(primitive mantle normalization date after McDonough et al., 1991)

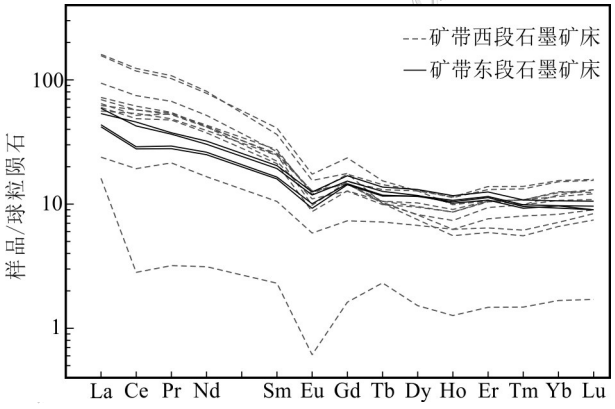

图6 旺苍-南江石墨矿带矿石样品稀土元素分配曲线图(球粒陨石标准值据Boynton,1984)

Fig.6 Chondrite-normalized REE distribute patterns of graphite ores from Wangcang-Nanjiang graphite ore belt (chondrite normalization date after Boynton, 1984)

亚区。

(al-alk)-c图解与(al+fm)-(c+alk)-Si图解常用于变质原岩识别(王仁民等,1986)。据图9显示,矿带西段的石墨矿床均落入铝质黏土、长石质黏土等碎屑岩区域附近,矿带东段的石墨矿床则因CaO、MgO含量较高而全部集中落入白云岩区域。图10显示,矿带西段的石墨矿床均落入泥质、砂质沉积岩等碎

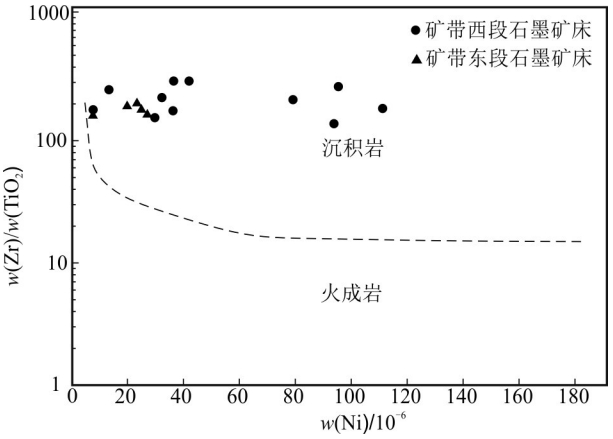

图 7　旺苍-南江石墨矿带矿石 Zr/TiO_2-Ni 图解(底图据 Winchester et al.,1980)

Fig.7　Zr/TiO_2-Ni diagram of the graphite ores from Wangcang-Nanjiang graphite ore belt(base map after Winchester et al.,1980)

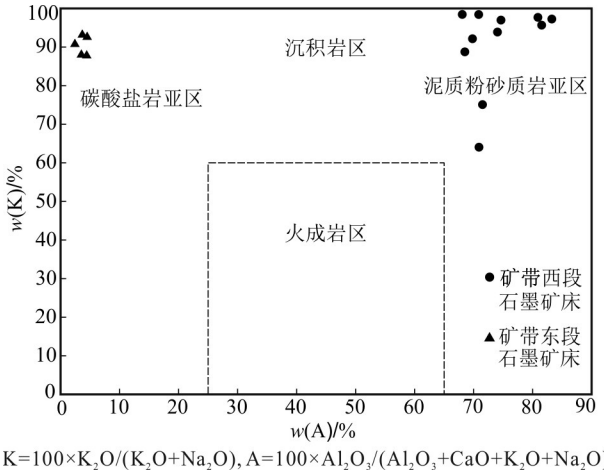

图 8　旺苍-南江石墨矿带矿石 K-A 图解(底图据周世泰,1981)

Fig.8　K-A diagram of the graphite ores from Wangcang-Nanjiang graphite ore belt(base map after Zhou, 1981)

屑岩区域,矿带东段的石墨矿床则落入钙质沉积岩区域。

综上所述,研究区石墨矿体原岩均为沉积岩,但旺苍-南江石墨矿带东、西两段石墨矿床的矿体具有不同的原岩类型:矿带西段的大营河坝、大河坝、坪河等石墨矿床主要为一套含碳黏土质细-粉砂岩,而矿带东段的尖山、庙坪等石墨矿床主要为含碳质的碳酸盐岩(白云岩)。

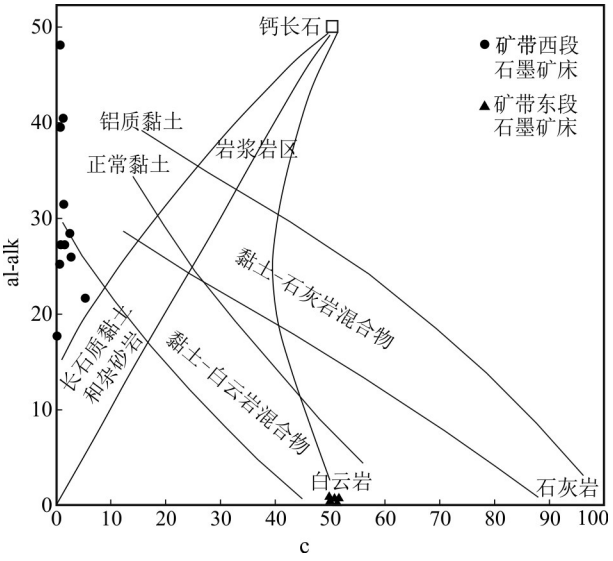

图 9　旺苍-南江石墨矿带矿石(al-alk)-c 图解(底图据 Leake, 1969)

Fig.9　(al-alk)-c diagram of the graphite ores from Wangcang-Nanjiang graphite ore belt (base map after Leake, 1969)

5.2　沉积环境

新元古代早期米仓山基底隆起东部为海相-海陆交互相巨厚火山沉积岩及 TTG 质酸性侵入岩等大陆边缘岛弧岩浆岩组合,其年龄主要集中于 0.97~0.82 Ga;西部主要发育钙碱性系列和拉斑玄武岩系列等弧后岩浆岩组合,年龄值多为 1.07~0.85 Ga(程建萍等,2000;甘保平等,2016a;何政伟等,1997b)。岩浆岩组合特征表明米仓山基底隆起西部在中元古

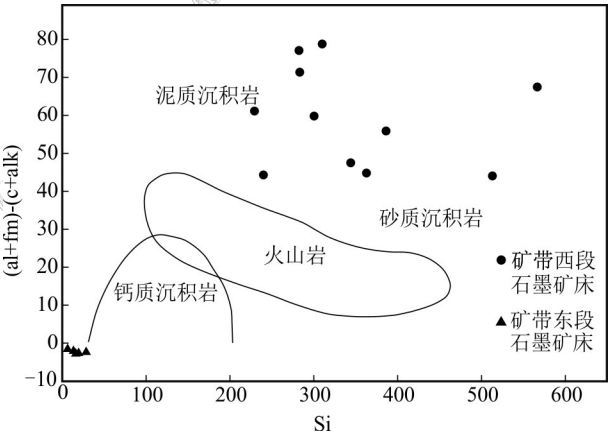

图 10　旺苍-南江石墨矿带矿石(al+fm)-(c+alk)-Si 图解(底图据 Simonen, 1953)

Fig.10　(al+fm)-(c+alk)-Si diagram of the graphite ores from Wangcang-Nanjiang graphite ore belt(base map after Simonen, 1953)

代末期及新元古代早期处于弧后海盆，可以认为同时代的麻窝子组碳酸盐岩-碎屑岩组合沉积于弧后盆地环境。

全岩Sr/Ba比值是指示沉积环境水体深浅和元素迁移富集的重要参数，在滨海和浅海地带沉积物Sr/Ba比值通常大于1；随着水体深度增加，Ba含量升高，沉积物的Sr/Ba比值通常小于1（刘英俊等，1987；朱立军等，1996）。矿带东段的石墨矿石Sr/Ba平均值为1.57，大于1，表明总体为浅海环境。矿带西段石墨矿体及围岩的Sr/Ba比值大于1，而石墨矿石由于Ba含量高、Sr含量低，Sr/Ba值远小于1（为0.03~0.26，平均0.11），这可能是由于原岩细粒碎屑沉积物及有机质吸附导致Ba富集，而Sr随流体迁移导致Sr流失造成的。在长期开放的沉积体系中，Eu^{2+}更易因化学风化被含水溶液带走，形成Eu负异常（严溶等，2006；杨培奇等，2017），研究区石墨矿石负Eu异常明显，同样指示浅海相沉积环境。

V、Ni、U、Th等元素的溶解度随氧化还原条件的改变产生极大变化，其含量可以作为恢复古海洋氧化还原环境变化的地球化学指标（Jones et al.,1994；林治家等，2008）。表4判别结果显示，矿带西段石墨矿床的矿体原岩沉积环境以贫氧-缺氧还原环境为主，矿带东段石墨矿床的矿体沉积环境以富氧的氧化环境为主。虽然V、Cr、Ni等元素比值在理论上能够反演地层的沉积环境，但对于变质岩原岩沉积环境判断仅能作为参考，富有机质沉积岩的沉积环境不太可能是富氧环境。研究区的麻窝子组二段巨厚碳酸盐岩主要沉积于较开阔的浅海碳酸盐台地，总体为富氧的氧化环境，而富含有机质的石墨矿体原岩可能是在局部半封闭的相对缺氧静水环境下沉积形成的。从碳质含量（固定碳品位）及地球化学指标等条件判断，矿带西段含矿层位沉积时的还原程度可能强于矿带东段。

5.3 物质来源

查明碳质来源是研究石墨矿床成因的关键。与生物成因有关的$\delta^{13}C$值较小，在沉积成岩过程中，$\delta^{13}C$值不断减小，最后形成石墨$\delta^{13}C$的区间为−25.5‰~−22.5‰（陈衍景等，2000；程林等，2020）。海相碳酸盐$\delta^{13}C$(‰)平均值约为0（郑永飞，2000），变质形成大理岩过程中，$\delta^{13}C$值进一步变大为正值。因此，石墨$\delta^{13}C$值可以直观判断石墨矿碳质来源。

表5显示，大河坝石墨矿床矿体$\delta^{13}C$值为−23.0‰~−18.6‰，平均−20.1‰；坪河石墨矿床矿体$\delta^{13}C$值为−21.7‰~−19.8‰，平均−20.7‰；尖山矿石墨床矿体$\delta^{13}C$值为−19.0‰~−16.0‰，平均−16.9‰。研究区石墨矿的$\delta^{13}C$值总体高于川南攀枝花中坝石墨矿床（夏锦胜等，2019），山东南墅石墨矿床（兰心俨，1981），黑龙江柳毛石墨矿床（李光辉等，2008）、原油、煤、沥青等（刘敬党等，2016）；但明显低于研究区及各石墨矿床大理岩（何政伟等，1997a；李光辉等，2008；马志鑫等，2018）等，这表明研究区石墨矿成矿碳质总体以有机碳为主。

5.4 成因分析

中元古代，米仓山地区处于扬子古陆边缘海盆环境，沉积了火地垭群下部的上两组。随着古秦岭大洋板块向南俯冲，秦岭南缘—汉南—米仓山地区构成“沟—弧—盆”的构造格局（何政伟等，1997a），研究区处于近大陆静水低能的弧后浅海环境，沉积了火地垭群上部麻窝子组大套富镁碳酸盐岩。在米仓山南西缘局部半封闭的贫氧-缺氧还原条件下，不均匀沉积了富含碳质的黏土及细-粉砂岩夹层，米仓山南东缘在局部贫氧的环境，沉积了含有机质的碳酸盐岩透镜体，形成了最初的石墨矿源岩层。

中元古代晚期，以格林威尔（Grenville）造山运动为标志的克拉通汇聚过程形成了罗迪尼亚（Rodinia）超大陆，在中国华南地区主要表现为以晋宁运动为代表的造山运动，并造成了扬子等陆块克拉通化（王江海，1998；李江海等，1999；郝杰等，2004；陆松年等，2004；2012；王生伟等，2013；叶云涛等，2017）。该过程在米仓山地区主要表现为强烈的褶皱及广泛的区域变质（变质年龄为（1058±26.3）Ma~（872±11.2）Ma），并包含至少2期变形-变质事件，火

表4 古水体氧化-还原环境微量元素判别指标（据Jones et al.,1994）

Table 4 Determination index of trace elements in ancient water oxidation-reduction environment（after Jones et al.,1994）

判别指标	缺氧还原环境	贫氧过度环境	富氧氧化环境	大营河坝石墨矿	大河坝石墨矿	坪河石墨矿	尖山石墨矿
V/Cr	>4.5	2.0~4.5	<2.0	4.00	3.25	4.71	0.62
V/(V+Ni)	>0.84	0.6~0.84	<0.6	0.80	0.76	0.81	0.38
U/Th	>1.25	0.75~1.25	<0.75	4.42	0.89	1.67	1.06

http://www.kcdz.ac.cn

表 5　旺苍-南江石墨矿带研究区石墨矿 ^{13}C 同位素测试结果与同类典型石墨矿床及相关地区对比

Table 5　The ^{13}C isotope test results of graphite ores from the study area in Wangcang-Nanjiang graphite ore belt are compared with typical similar graphite deposits and related areas

序号	样品编号	$\delta^{13}C$/‰	平均值/‰	序号	样品岩性	$\delta^{13}C$/‰	资料来源
1	DH-1	−18.6	−20.1	12	石墨矿	−24.5~−22.0	南江坪河石墨矿床(马志鑫等,2018)
2	DH-2	−19.3		13	大理岩围岩	+0.60~+1.50	南江坪河石墨矿床(马志鑫等,2018)
3	DH-3	−19.4		14	大理岩	+0.96~+2.05	南江麻窝子组(何政伟等,1997a)
4	DH-4	−23.0		15	石墨片岩	−28.4~−28.0	攀枝花中坝石墨矿床(夏锦胜等,2019)
5	PH-1	−19.8	−20.7	16	石墨大理岩	−27.64	攀枝花中坝石墨矿床(夏锦胜等,2019)
6	PH-2	−21.7		17	石墨矿	−24.0~−21.2	山东南墅石墨矿床(兰心俨,1981)
7	PH-3	−20.5		18	大理岩	+0.8~+1.5	山东南墅石墨矿床(兰心俨,1981)
8	JS-1	−19.0	−16.9	19	石墨矿	−16.8~−24.4	黑龙江柳毛石墨矿床(李光辉等,2008)
9	JS-2	−16.6		20	大理岩	−5.60~+3.00	黑龙江柳毛石墨矿床(李光辉等,2008)
10	JS-3	−16.1		21	煤、沥青	−21.7~−31.2	浙江安吉、开化、淳安(刘敬党等,2016)
11	JS-4	−16.0		22	原油	−24.0~−27.0	渤海、任丘、大港(刘敬党等,2016)

注:序号 1~11 数据为本文分析测试结果,测试单位为核工业北京地质研究院分析测试研究中心;序号 12~22 为引用数据。

地垭群受到强烈挤压形成了北东东走向褶皱及脆韧性断裂构造(刘肇昌,1984;魏显贵等,1997;何政伟等,1999;薛国栋等,2018)。同时,伴随了基性、超基性幔源橄榄拉斑玄武岩浆(成岩年龄 1317~1065 Ma)及与板块俯冲有关的钙碱性岩浆(成岩年龄 942~870 Ma)侵位(马润则等,1997a;1997b;肖渊甫等,1997a)。离岩体较远的麻窝子组三段碳质板岩具弱石墨矿化,表明在罗迪尼亚超大陆聚合引发的晋宁期造山运动过程中,研究区沉积的石墨矿源岩层受区域变质已开始了初步石墨成矿,成了最初的石墨矿体。

新元古代早期,扬子陆块转换为拉张的大地构造背景,沿扬子古陆块西北缘形成了龙门山-米仓山大陆裂谷,和与裂谷作用有关的坪河碱性-超基性侵入岩群、云雾山基性-中性侵入岩及宽滩河钾长花岗岩群等相继侵位,其年龄主要集中在 870~740 Ma(肖渊甫等,1997b;1998;赵凤清等,2006;徐学义等,2011;Dong et al., 2011;2012;甘保平等,2016a;2016b;李双建等,2018;Wang et al., 2019),指示了罗迪尼亚超大陆裂解。该期岩浆活动规模较大,其南侧的岩体多侵入至火地垭群,在侵入岩体与含矿层位接触区域形成了石英-透辉石-透闪石-滑石角岩变质带,并在局部形成了边缘混合岩化,此过程为石墨进一步成矿提供了温压条件,近岩体矿体固定碳品位明显高于远离岩体的矿体。笔者在坪河石墨矿床矿体中获得变质锆石 U-Pb 年龄为(754.9±3.0)Ma(另文刊出),与罗迪尼亚超大陆裂解有关的坪河二长花岗岩侵入年龄((742.1±5.9)Ma;甘保平等,2016a)相近,表明研究区石墨矿体在晋宁期初步变质成矿后还经历了澄江期岩浆活动叠加变质作用。

研究区含矿地层在中-新元古代沉积成岩,在罗迪尼亚超大陆汇聚、裂解引发的变质-岩浆活动背景下,含碳质石墨矿源岩层先后经历了区域变质、热接触变质及混合岩化,有机碳变质结晶为石墨,石墨粒径不断重结晶增大,形成晶质石墨矿体。在成矿过程中,矿带东段能干性强的石墨大理岩层被北东走向断裂带破碎,形成了尖山、庙坪等沿断裂带分布的石墨角砾岩型石墨矿体;而西部含碳质黏土及细-粉砂岩层则形成了坪河、大河坝等层控特征明显的石墨片岩型石墨矿体。

6　结　论

(1) 研究区石墨矿沉积环境为浅海碳酸盐台地,所处大地构造位置为弧后盆地。局部的沉积环境变化形成了富含有机质的矿源岩层:矿带东段矿体具低 Si、Al,高 Ca、Mg 的特点,原岩以含碳质的碳酸盐岩为主,沉积于贫氧的环境;矿带西段矿体具高 Si、Al,低 Ca、Mg 的特点,原岩以含碳质黏土、泥砂质岩为主,并普遍富钒,沉积环境为贫氧-缺氧的还原环境。

(2) 研究区大河坝石墨矿床 $\delta^{13}C$ 值为−23.0‰~−18.6‰,平均−20.1‰;坪河石墨矿床 $\delta^{13}C$ 值为−21.7‰~−19.8‰,平均−20.7‰;尖山石墨矿床 $\delta^{13}C$ 值为−19.0‰~−16.0‰,平均−16.9‰。$\delta^{13}C$ 值高于有机质,明显低于大理岩,表明成矿碳质来源总体以有机

http://www.kcdz.ac.cn

碳为主。

（3）米仓山南缘石墨矿床为沉积-变质成因，石墨含矿层位沉积后，先后经历了由罗迪尼亚超大陆汇聚-裂解导致的晋宁期区域变质及晋宁期—澄江期岩浆侵入引发的热接触变质和边缘混合岩化变质等多期次、长时间变质作用，最终形成晶质石墨矿床。因此，区域石墨成矿与罗迪尼亚超大陆汇聚-裂解引发的区域变质-岩浆活动有关。

References

An J H, Tang F P and Li J. 2016. Metallogenic rules and resource potential of the graphite deposit in Hunan Province[J]. Journal of Geology, 40(3): 433-437(in Chinese with English abstract).

Bai J K, Chen J L and Peng S X. 2017. Characteristics and metallogeny regulation of graphite resources in Xinjiang[J]. Acta Geologica Sinica, 91(12): 2828-2840(in Chinese with English abstract).

Bai J K, Chen J L and Peng S X. 2018. Geochronology and geochemistry of ore-bearing intrusions from Huangyangshan magmatic hydrothermal graphite deposit in Qitai County, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 34(8): 2327-2340(in Chinese with English abstract).

Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[A]. In: Henderson P, ed. Rare earth element geochemistry[C]. Amsterdam: Elsevier. 63-114.

Cai W C, Zeng Z C, Song S G, Li J C, Wu H and Chen Y. 2020. Geological characteristics and genesis of the Xianghe crystalline graphite deposit in Shangnan County of Shaanxi Province[J]. Northwestern Geology, 53(3): 220-232(in Chinese with English abstract).

Chen J Y, Yan L Y, Liu Y F, Sun J X and Zhou W. 2020. Analysis of supply and demand situation of global graphite resources[J]. Natural Resources Information, (10): 90-97(in Chinese with English abstract).

Chen Y J, Liu C Q, Chen H Y, Zhang Z J and Li C. 2000. Carbon isotope geochemistry of graphite deposits and ore-bearing khondalite series in North China: Implications for several geoscientific problems[J]. Acta Petrologica Sinica, 16(2): 233-244(in Chinese with English abstract).

Cheng J P and Ling W L. 2000. Micangshan Neoproterozoic igneous province in Northwest Yangtze Block, South China: A potential testee in Rodinia supercontinent reconstruction[J]. Geological Science and Technology Information, 19(3): 12-16(in Chinese with English abstract).

Cheng L, Yang Y, Bian M, Yang H W, Liu L, Liu H, Huang D J and Yao J Q. 2020. Geochemical characteristics and genesis of flake graphite ores in the core of the Huangling fault dome, Hubei Province[J]. Geology and Exploration, 56(4): 745-758(in Chinese with English abstract).

Deng S J, Zhu Y Y and Li H J. 2020. Protolith recovery and discussion on paleosedimentary environment of Pinghe graphite metamorphic rocks in Nanjiang[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 35(1): 22-30(in Chinese with English abstract).

Duan W, Huang J, Tang W C, Li L C and Ran Q. 2020. Reconnaissance report on Daheba graphite mine in Wangcang County, Sichuan Province[R]. Deyang: Geochemistry Exploration Team of Sichuan Bureau of Geology and Minerals Resources. Unpublished report (in Chinese with English abstract).

Dong Y P, Liu X M, Santosh. M, Chen Q, Zhang X N, Li W, He D F and Zhang G W. 2012. Neoproterozoic accretionary tectonics along the northwestern margin of the Yangtze Block, China: Constraints from zircon U-Pb geochronology and geochemistry[J]. Precambrian Research, 196-197(none): 247-274.

Dong Y P, Liu X M, Santosh. M, Zhang X N, Chen Q, Yang C and Zhao Y. 2011. Neoproterozoic subduction tectonics of the northwestern Yangtze Block in South China: Constrains from zircon U-Pb geochronology and geochemistry of mafic intrusions in the Hannan massif[J]. Precambrian Research, 189(1-2): 66-90.

Duan W, Tang W C, Li L C, Ran Q, Zhang F, Li X S and Xu Y S. 2021. Geochemical characteristics and genesis analysis of Daheba epimetamorphic graphite deposit in Wangcang, Sichuan Province[J]. Geoscience, 35(3): 599-607(in Chinese with English abstract).

Feng Y W, Qu H J, Yang C Y and Lü L S. 2015. Distribution characteristics and metallogenic regularity of graphite deposits in Qinling Orogen, China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 89(4): 1244-1263.

Gao X Z, Wang W Y, Liu J H and Lei J N. 2015. Supplement exploration report on Jianshan graphite mine in Nanjiang County, Sichuan Province[R]. Chengdu: Branch of China National Geological Expioration Center of Building Materials Industry. Unpublished report. Attached 3 (in Chinese with English abstract).

Gan B P, Lai S C and Qin J F. 2016a. Petrogenesis and implications for the Neoproterzoic monzogranite in Pinghe, Micang Mountain[J]. Geological Review, 62(4): 929-944(in Chinese with English abstract).

Gan B P, Lai S C and Qin J F. 2016b. Geochemistry of the bojite from the Xinmin area, Micang Mountain[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 35(2): 213-228(in Chinese with English abstract).

Gao R X, Gao X Z, Du J R, Chen H J, Wang W Y, Liao H and Mao Y. 2019. Study on geological conditions and metallogenic prediction of graphite deposit in Bazhong area, Sichuan Province[J]. China Non-metallic Minerals Industry, (1): 43-45(in Chinese with English abstract).

Hao J and Zhai M G. 2004. Jinning movement and Sinian system in China: Their relationship with Rodinia super continent[J]. Chinese Journal of Geology, 39(1): 139-152(in Chinese with English abstract).

http://www.kcdz.ac.cn/

He D L, Liu D Z, Deng M S and Zhou Y. 1995. Age of crystalline basement of Yangtze plantform in the Michang mountains,Sichuan[J]. Acta Geologica Sichuan, 15(3): 176-183(in Chinese with English abstract).

He Z W, Wei X G, Liu Y C and Wu D C. 1996. The geology and petrogeochemical features of metamorphic complex in the western margin of the Michangshan[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 16(4): 23-31(in Chinese with English abstract).

He Z W, Liu Y C, Wei X G, Xiao Y F, Ma R Z and Wu D C. 1997a. Isotopic geochronology of basement metamorphic rock series in the Micangshan area along the northern margin of Yangtze Craton, China[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 17(S1): 86-90(in Chinese with English abstract).

He Z W, Wei X G, Wu D C and Liu Y C. 1997b. A discussion on petrologlcal-geochemical characteristics and age of the Huodiya group in the South Micangshan mountains[J]. Acta Geologica Sichuan, 16(1): 8-16(in Chinese with English abstract).

He Z W, Wei X G, Liu Y C, Ma R Z and Xiao Y F. 1999. Pre-Sinian metamorphism in the Micang moutain area along the northern margin of the Yangtze Craton[J]. Regional Geology of China, 18 (1): 35-39(in Chinese with English abstract).

Jones B and Manning D A C. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. Chemical Geology, 111(1/4): 111-129.

Lan X Y. 1981. The characteristics of graphite-bearing formation and study on the genesis of graphite deposit during Pre-Cambrian period[J]. Journal of Changchun Institute of Technology, 11(3): 32-44(in Chinese with English abstract).

Leake B. 1969. The discrimination of ortho and para charnockitic rocks, anorthosites and amphibolites[J]. Indian Mineralogist. ,10 (1):89-104.

Li C, Wang D H, Zhao H, Pei H X, Li X W, Zhou L M, Du A D and Qu W J. 2015. Minerogenetic regularity of graphite deposits in China[J]. Mineral Deposits, 34(6): 1223-1236(in Chinese with English abstract).

Li G H, Huang Y W, Wu R T and Xu D J. 2008. Origin of carbon and concentration of uranium and vanadium from Liumao graphite Formation in Jixi[J]. Global Geology, 27(1): 19-22(in Chinese with English abstract).

Li J H and Mu J. 1999. Tectonic constraints from Chinese cratonic blocks for the reconstruction of Rodinia[J]. Chinese Journal of Geology, 34(3): 259-272(in Chinese with English abstract).

Li S J, Sun D S, Cai L G, Gao P, Li T Y, Yuan Y S, Zhen M L and Qiu D F. 2018. Detrital zircon U-Pb geochronology of Micang Mountain piedmont zone, northern Sichuan basin and its significance to basin-mountain evolution[J]. Geotectonica et Metallogenia, 42(6): 1087- 1107(in Chinese with English abstract).

Liang S. 2015. Genisis studies of typical crystalline graphite deposits, in the North China[D]. Liaoning: Liaoning Technical University. 26-30(in Chinese with English abstract).

Lin Z J, Chen D F and Liu Q. 2008. Geochemical indices for redox conditions of marine sediments[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 27(1): 72-80(in Chinese with English abstract).

Liu J D, Xiao R G, Zhang Y F, Zhao S and Zhao Q. 2017. Crystalline graphite deposits in North China[M]. Beijing: Science Press. 47-68(in Chinese).

Liu J Z, Qian X L and Chen Y P. 1989. The tectonic origin of graphite deposits in the Khondalite Group, the middle part of inner Mongolia, China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 13(2):162-167(in Chinese with English abstract).

Liu S B, Yang M Z, Wu H E, Zhao W P and Zhang L L. 2011. Metallogenic model of graphite deposit from Sujiquan, eastern Junggaer[J]. Xinjiang Geology, 29(2): 178-182(in Chinese with English abstract).

Liu Y J and Cao L M. 1987. Introduction to element geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House. 53-56(in Chinese).

Liu Y L. 2019. Geological characteristics of Yunshan graphite deposit in Luobei, Heilongjiang Province[J]. China Non-Metallic Minerals Industry, 138 (4): 28-31+61(in Chinese with English abstract).

Liu Z C. 1984. Rootless intrafolial folds and foliation transposition in the Huodiya Group in the metamorphic zone of mount Micang[J]. Chinese Journal of Geology, 19(2):208-215(in Chinese with English abstract).

Lu S N, Li H K, Chen Z H, Yu H F, Jin W and Guo K Y. 2004. Relationship between Neoproterozoic Cratons of China and the Rodinia[J]. Earth Science Frontiers, 11(2): 515-523(in Chinese with English abstract).

Lu S N, Xiang Z Q, Li H K, Wang H C and Chu H. 2012. Response of the North China Craton to Rodinia supercontinental events—GOSEN joining hypothesis[J]. Acta Geologica Sinica, 86(9): 1396-1406(in Chinese with English abstract).

Ma R Z, Xiao Y F, Wei X G, He Z W and Li Y G. 1997a. The magmatic activity and tectonic evolution in the Micangshan area, China[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 17(Supp.): 79-85(in Chinese with English abstract).

Ma R Z, Xiao Y F, Wei X G and Li Y G. 1997b. Research on the geochemical property and genesis of basic and ultrabaisc rocks of Jinning period in the Micangshan area, Sichuan Province[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 17(Supp.): 38-50(in Chinese with English abstract).

Ma X D, Zhong Y, Chen Y L and Qu X M. 2019. Sedimentary process controls on the graphite mineralized in the khondalite series, western North China Craton[J]. Geotectonica et Metallogenia, 43(6): 1155-1168(in Chinese with English abstract).

Ma Y, Gao R X, Li J L, Chen K and Zhang L J. 2019. Geological characteristics and prospecting criteria of crystalline graphite deposit in Panzhihua, Sichuan Province[J]. China Non-Metallic Minerals Industry, 138 (Supp.): 50-53+60(in Chinese with English abstract).

Ma Z X, Luo M J, Liu X T and Sun Z M. 2018. Carbon source and metallogenic mechanism of Pinghe graphite deposit at Nanjiang, Sichuan Province[J]. Geological Science and Technology Informa-

http://www.kcdz.ac.cn/

tion, 37(3): 134-139(in Chinese with English abstract).

McDonough W F, Sun S S, Ringwood A E, Jagoutz E and Hofmann A W. 1992. K, Rb and Cs in the Earth and Moon and the evolution of the Earth's mantle[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 56 (3): 1001-1012.

Mo R J, Liu S B, Huang C R, Zhang G R, Tan G M, Wang B X and Xiao X Z. 1989. Geology of graphite deposits in China[M]. Beijing: China Architeeture Industrial Press. 42-50(in Chinese with English abstract).

Simonen A. 1953. Stratigraphy and sedimentation of the Svecofennidic, Early Archean supracrustal rocks in southwestern Finland[J]. Bulletin of the Geological Society of Finland, 160(1): 1-64.

Taylor H P and Sheppard S M F. 1986. Isotopic fractionation and isotope systematics[J]. Reviews in Mineralogy, 16(1): 227-271.

Taylor S R and Mclennan S M. 1985. The continental crust: Its composition and evolution[J]. The Journal of Geology, 94(4): 57-72.

Wang H J, Hou X W, Cen H T and Wei J S. 2017. Geological characteristics and genesis of the Miaoping graphite deposit at Nanjiang, Sichuan Province[J]. Science and Technology Innovation Herald, 14(6): 45-46+ 48(in Chinese with English abstract).

Wang H J, Wei J S, Li Y, Zhuang J Y and Li J F. 2019. General Survey Report on Miaoping Graphite Mine in Nanjiang County, Sichuan Province[R]. Deyang: No. 280 China National Nuclear Corporation. Unpublished report.

Wang H Z, Laurent O, Zhang H F, Zhang H, Chen X and Zhai M G. 2019. Recognition and significance of 800 Ma upper amphibolite to granulite-facies metamorphism in meta-sedimentary rocks from the NW margin of Yangtze Block[J]. Journal of the Geological Society, 177(2): 424-441.

Wang J H. 1998. Reconstruction of the Proterozoic Pangaea of Rodinia[J]. Earth Science Frontiers, 5(4):54-61(in Chinese with English abstract).

Wang R M, He G P, Chen Z Z, Zheng S Y and Geng Y S. 1986. Graphic discrimination of protolith of metamorphic rocks[M]. Beijing: Geological Publishing House. 4-165(in Chinese).

Wang S L. 1989. Characteristics of ore-bearing formation and genesis of the Xinche graphite deposit in inner Mongolia[J]. Mineral deposits, 8(1): 85-96(in Chinese with English abstract).

Wang S W, Liao Z W, Sun X M, Zhou B G, Guo Y, Jiang X F, Zhu H P, Sun Z M, Luo M J, Ma D, Shen Z W and Zhang H. 2013. Age and geochemistry of the Caiyuanzi granite in Sichuan, SW China: Mechanism of the grenvillian orogenic movement in the western margin of Yangtze Block[J]. Acta Geologica Sinica, 87(1): 55-70 (in Chinese with English abstract).

Wei X G, Du S Q, He Z W, Liu Y C and Wu D C. 1997. The tectonic evolution of Micangshan area[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 17(Supp.): 110-116(in Chinese with English abstract).

Winchester J A, Park R G and Holland J G. 1980. The geochemistry of Lewisian semipelitic schists from the Gairloch district, Wester Ross[J]. Scottish Journal of Geology, 16(2): 165-179.

Wu L, Qian J F, Xiao A C, Shen Z Y, Wang L, Wei G Q and Zhang L. 2011. Structural analysis of the Micang Shan basement-involved thrust belt in the western edge of the Yangtze Block[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(3): 681-688(in Chinese with English abstract).

Xia J S, Sun L, Xiao K Y and Zhu Y S. 2017a. Geological characteristics and genesis of Pinghe graphite deposit in Nanjiang County, Sichuan Province[J]. Modern Mining, 33(2): 57-59+77(in Chinese with English abstract).

Xia J S, Sun L and Xiao K Y. 2017b. Geological characteristics and genesis of Jianshan graphite deposit in Nanjiang County, Sichuan Province[J]. Journal of Geology, 41(2): 212-217(in Chinese with English abstract).

Xia J S, Sun L, Xiao K Y, Wang J Z, Chen X and Cui N. 2019. Geochemical features and genesis analysis of the Zhongba scaly graphite deposit in Sichuan Province[J]. Geoscience, 33(6): 1286-1294(in Chinese with English abstract).

Xiao Y F, Ma R Z, Wei X G, He Z W and Li Y G. 1997a. The petrogeochemical characteristics and evolutions of the intermediate rocks system in Jinning period from the Micangshan area, Sichuan[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 17(Supp.): 70-73+75-78(in Chinese with English abstract).

Xiao Y F, Ma R Z, He Z W and Wei X G. 1997b. The units characteristics and tectonic settings of the alkalic complex in Micangshan[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 17(Supp.): 62-69(in Chinese with English abstract).

Xiao Y F, Ma R Z, Wei X G, He Z W and Li Y G. 1998. The characteristics and genesis of the basic intrusive complex in Chengjiang period, Micangshan, Sichuan[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 25(4):68-73(in Chinese with English abstract).

Xu X Y, Li T, Chen J L, Li P, Wang H L and Li Z P. 2011. Zircon U-Pb age and petrogenesis of intrusions from Mengzi area in the northern margin of Yangtze plate[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(3): 699-720(in Chinese with English abstract).

Xue G D, He Z W, Xiang Q R, Wu A R, Wang G Q and Zhang J S. 2018. Metamorphic age and geological significance of metamorphic rock in the South Micang Mts[J]. Acta Geologica Sichuan, 38 (2): 202-207+211(in Chinese with English abstract).

Yan L Y, Gao S X, Chen Z G, Jiao L X, Sun L, Liu Y F and Zhou W. 2018. Metallogenic characteristics and metallogenic zoning of graphite deposits in China[J]. Geology in China, 45(3): 421-440 (in Chinese with English abstract).

Yan R, Zhou H W, Zeng W, Jiang L S, Zhou Z Y and Chen T L. 2006. Geochemical characteristics of khondalite series within Kongling Group in Yichang City, Hubei Province[J]. Geological Science and Technology Information, 25(5): 41-46(in Chinese with English abstract).

Yang B, Li C Y, Bo H J, Hou X H, Su P Y and Fan S H. 2023. Geochemical characteristics and genesis of Changhangou crystalline graphite deposit in Hadamengou area, Inner Mongolia[J]. Mineral Deposits, 42(2):444-462(in Chinese with English abstract).

Yang P Q, Liu J D, Zhang Y F, Liang S, Zhao Y and Liu S M. 2017. Ore geochemical characteristics and metallogenic epoch of typical

http://www.kcdz.ac.cn/

graphite deposits in Jiamusi Massif, Heilongjiang Province[J]. Geology in China, 44(2): 301-315(in Chinese with English abstract).

Ye Y T, Wang H J, Zhai L N, Zhou W X, Wang X M, Zhang S C and Wu C D. 2017. Geological events and their biological responses during the Neoproterozoic Era[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 35 (2): 203-216(in Chinese with English abstract).

Yi C S. 2019. Mineral characteristics and metallogenic regularity of graphite ore in Hubei Province[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 42(3): 361-369+386(in Chinese with English abstract).

Yu J L and Qiu D S. 2012. Geological characteristic and prospect prediction of graphite mineralization in Henan Province[J]. China Non-metallic Minerals Industry, 98(4): 60-62(in Chinese with English abstract).

Zhao F Q, Zhao W P, Zuo Y C, Li Z H and Xue K Q. 2006. U-Pb geochronology of Neoproterozoic magmatic rocks in Hanzhong, southern Shanxi, China[J]. Geological Bulletin of China, 25(3): 383-388(in Chinese with English abstract).

Zheng Y F. 2000. Stable isotope geochemistry[M]. Beijing: Science Press. 6-7(in Chinese).

Zhou S T. 1981. A new petrochemical method in restoring the original of metamorphic rocks—KA diagram[J]. Acta Geological Liaoning, 1(1):178-188(in Chinese with English abstract).

Zhou S T. 1984. Examination of 17 Petrochemical methods of restoring in protoliths of metamorphic rocks[J]. Geological Review, 30 (1): 81-84(in Chinese with English abstract).

Zhu L J and Zhao Y L. 1996. Studies of trace elements and REE geochemisty of sedimentary rocks in Middle-Lower Cambian boundary section of Taijiang, Guizhou[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 35(5): 623-630(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

安江华, 唐分配, 李杰 . 2016. 湖南石墨矿成矿规律与资源潜力分析[J]. 地质学刊, 40(3) : 433-437.

白建科, 陈隽璐, 彭素霞 . 2017. 新疆石墨资源特征及成矿规律[J]. 地质学报, 91(12) : 2828-2840.

白建科, 陈隽璐, 彭素霞 . 2018. 新疆奇台县黄羊山岩浆热液型石墨矿床含矿岩体年代学与地球化学特征[J]. 岩石学报, 34(8) : 2327-2340.

蔡文春, 曾忠诚, 宋曙光, 李景晨, 吴昊, 陈艳 . 2020. 陕西商南湘河晶质石墨矿床地质特征与成因探讨[J]. 西北地质, 53(3): 220-232.

陈军元, 颜玲亚, 刘艳飞 ,孙即秀, 周雯 . 2020. 全球石墨资源供需形势分析[J]. 国土资源情报, (10): 90-97.

陈衍景, 刘丛强, 陈华勇, 张增杰, 李超 . 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[J]. 岩石学报, 16 (2): 233-244.

程建萍, 凌文黎 . 2000. 米仓山新元古代岩浆岩省——一个潜在的 Rodinia 重建方案验证地区[J]. 地质科技情报, 19(3): 12-16.

程林, 杨勇, 边敏, 杨宏伟, 刘林, 刘海, 黄德将, 姚敬劬 . 2020. 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, 56(4): 745-758.

邓绍军, 朱余银, 李虎杰 . 2020. 南江坪河石墨矿变质岩原岩恢复及古沉积环境探讨[J]. 西南科技大学学报, 35(1): 22-30.

段威, 黄健, 唐文春, 黎龙昌, 冉强 . 2020. 四川省旺苍县大河坝石墨矿预查报告[R]. 德阳: 四川省地质矿产勘查开发局化探队 . 内部报告 .

段威,唐文春,黎龙昌,冉强,张飞,李小松,徐永胜 . 2021. 四川旺苍大河坝浅变质岩型石墨矿床地球化学特征与成因分析[J]. 现代地质 . 35(3):599-607.

高显忠, 王文玉, 刘江河, 雷爵能 . 2015. 四川省南江县尖山石墨矿补充勘探报告[R]. 成都: 中国建筑材料工业地质勘查中心四川总队(内部报告).

甘保平, 赖绍聪, 秦江锋 . 2016a. 米仓山坪河新元古代二长花岗岩成因及其地质意义[J]. 地质论评, 62(4) : 929-944.

甘保平, 赖绍聪, 秦江锋 . 2016b. 米仓山新民角闪辉长岩地球化学特征及其构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 35(2): 213-228.

高瑞祥, 高显忠, 杜金锐, 陈海军, 王文玉, 廖海, 毛艺 . 2019. 四川省巴中地区石墨成矿地质条件研究及成矿预测[J]. 中国非金属矿工业导刊, 138(1): 43-45.

郝杰, 翟明国 . 2004. 罗迪尼亚超大陆与晋宁运动和震旦系[J]. 地质科学, 39(1): 139-152.

何大伦, 刘登忠, 邓明森, 周游 . 1995. 四川米仓山地区扬子地台结晶基底的时代归属[J]. 四川地质学报, 15(3): 176-183.

何政伟, 魏显贵, 刘援朝, 吴德超 . 1996. 米仓山西缘变质杂岩地质和岩石地球化学特征[J]. 矿物岩石, 16(4): 23-31.

何政伟, 刘援朝, 魏显贵, 肖渊甫, 马润则, 吴德超 . 1997a. 扬子克拉通北缘米仓山地区基底变质岩系同位素地质年代学[J]. 矿物岩石, 17(增): 86-90.

何政伟, 魏显贵, 吴德超, 刘援朝 . 1997b. 南米仓山火地垭群岩石地球化学特征及时代探讨[J]. 四川地质学报, 16(1): 8-16.

何政伟, 魏显贵, 刘援朝, 马润则, 肖渊甫 . 1999. 扬子克拉通北缘米仓山地区前震旦纪变质作用特征[J]. 中国区域地质, 18(1): 35-39.

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[J]. 长春地质学院学报, 11(3): 32-44.

李超, 王登红, 赵鸿, 裴浩翔, 李欣尉, 周利敏, 杜安道, 屈文俊 . 2015. 中国石墨矿床成矿规律概要[J]. 矿床地质, 34(6): 1223-1236.

李光辉, 黄永卫, 吴润堂, 徐大杰 . 2008. 鸡西柳毛石墨矿碳质来源及铀、钒的富集机制[J]. 世界地质, 27(1): 19-22.

李江海, 穆剑 . 1999. 中国境内格林威尔期造山带的存在及其对中元古代末期超大陆再造的制约[J]. 地质科学, 34(3): 259-272.

李双建, 孙冬胜, 蔡立国, 高平, 李天义, 袁玉松, 郑孟林, 邱登峰 . 2018. 川北米仓山山前带碎屑锆石 U-Pb 年代学及盆山演化意义[J]. 大地构造与成矿学, 42(6): 1087- 1107.

梁帅 . 2015. 华北典型晶质石墨矿床成因研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学 . 26-30.

林治家, 陈多福, 刘芊 . 2008. 海相沉积氧化还原环境的地球化学识别指标[J]. 矿物岩石地球化学通报, 27(1): 72-80.

刘敬党, 肖荣阁, 张艳飞, 梁帅, 赵青 . 2017. 华北显晶质石墨矿床[M].

http://www.kcdz.ac.cn/

北京: 科学出版社. 47-68.

刘金中, 钱祥麟, 陈亚平. 1989. 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, 13(2):162-167.

刘松柏, 杨梅珍, 吴洪恩, 赵文平, 张练练. 2011. 新疆苏吉泉球状石墨矿床成矿模式[J]. 新疆地质, 29(2):178-182.

刘英俊, 曹励明. 1987. 元素地球化学导论[M]. 北京: 地质出版社. 53-56.

刘彦林. 2019. 黑龙江萝北云山石墨矿床地质特征[J]. 中国非金属矿工业导刊, 138(4): 28-31+ 61.

刘肇昌. 1984. 米仓山变质带火地垭群中片内无根褶皱与面理置换[J]. 地质科学, 19(2):208-215.

陆松年, 李怀坤, 陈志宏, 于海峰, 金巍, 郭坤一. 2004. 新元古时期中国古大陆与罗迪尼亚超大陆的关系[J]. 地学前缘, 11(2): 515-523.

陆松年, 相振群, 李怀坤, 王惠初, 初航. 2012. 华北克拉通对罗迪尼亚超大陆事件的响应——GOSEN连接假设[J]. 地质学报, 86(9): 1396-1406.

马润则, 肖渊甫, 魏显贵, 何政伟, 李佑国. 1997a. 米仓山地区岩浆活动与构造演化[J]. 矿物岩石, 17(增): 79-85.

马润则, 肖渊甫, 魏显贵, 李佑国. 1997b. 四川米仓山地区晋宁期基性超基性岩地球化学性质及其成因研究[J]. 矿物岩石, 17(增): 38-50.

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[J]. 大地构造与成矿学, 43(6): 1155-1168.

马源, 高瑞祥, 李金林, 陈坎, 张丽娇. 2019. 四川攀枝花晶质石墨矿地质特征及找矿标志[J]. 中国非金属矿工业导刊, 138(增): 50-53+60.

马志鑫, 罗茂金, 刘喜停, 孙志明. 2018. 四川南江坪河石墨矿碳质来源及成矿机制[J]. 地质科技情报, 37(3): 134-139.

莫如爵, 刘绍斌, 黄翠蓉, 张光荣, 谭冠民, 王宝娴, 肖祥章. 1989. 中国石墨矿床地质[M]. 北京: 中国建筑工业出版社. 42-50.

王红军, 侯学文, 岑海涛, 魏继生. 2017. 四川省南江县庙坪石墨矿成矿地质特征及成因探讨[J]. 科技创新导报, 14(6): 45-46+48.

王红军, 魏继生, 李勇, 庄景遗, 李金锋. 2019. 四川省南江县庙坪石墨矿普查报告[R]. 德阳: 核工业二八〇研究所(内部报告).

王江海. 1998. 元古宙罗迪尼亚(Rodinia)泛大陆的重建研究[J]. 地学前缘, 5(4):54-61.

王仁民, 贺高品, 陈珍珍, 郑松彦, 耿元生. 1986. 变质岩原岩图解判别法[M]. 北京: 地质出版社. 4-7+163-165.

王生伟, 廖震文, 孙晓明, 周邦国, 郭阳, 蒋小芳, 朱华平, 孙志明, 罗茂金, 马东, 沈战武, 张海. 2013. 会东菜园子花岗岩的年龄、地球化学——扬子地台西缘格林威尔造山运动的机制探讨[J]. 地质学报, 87(1): 55-70.

王时麒. 1989. 内蒙兴和石墨矿含矿建造特征与矿床成因[J]. 矿床地质, 8(1): 85-96.

魏显贵, 杜思清, 何政伟, 刘援朝, 吴德超. 1997. 米仓山地区构造演化[J]. 矿物岩石, 17(增): 110-116.

吴磊, 钱俊锋, 肖安成, 沈中延, 王亮, 魏国齐, 张林. 2011. 扬子地块西侧米仓山基底卷入式冲断带的结构分析[J]. 岩石学报, 27(3): 681-688.

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[J]. 现代地质, 33(6): 1286-1294.

夏锦胜, 孙莉, 肖克炎, 朱裕生. 2017a. 四川省南江县坪河石墨矿床地质特征及成因分析[J]. 现代矿业, 33(2): 57-59+ 77.

夏锦胜, 孙莉, 肖克炎. 2017b. 四川南江尖山石墨矿床地质特征及成因[J]. 地质学刊, 41(2): 212-217.

肖渊甫, 马润则, 魏显贵, 何政伟, 李佑国. 1997a. 四川米仓山地区晋宁期中性侵入岩序列岩石地球化学特征及其演化[J]. 矿物岩石, 17(增): 70-73+75-78.

肖渊甫, 马润则, 何政伟, 魏显贵. 1997b. 米仓山碱性杂岩单元特征及构造环境分析[J]. 矿物岩石, 17(增): 62-69.

肖渊甫, 马润则, 魏显贵, 何政伟, 李佑国. 1998. 米仓山澄江期基性侵入杂岩特征及其成因探讨[J]. 成都理工学院学报, 25(4):68-73.

徐学义, 李婷, 陈隽璐, 李平, 王洪亮, 李智佩. 2011. 扬子地台北缘檬子地区侵入岩年代格架和岩石成因研究[J]. 岩石学报, 27(3) : 699-720.

薛国栋, 何政伟, 向启荣, 吴安容, 王广强, 张矩生. 2018. 南米仓山变质岩变质时代及地质意义[J]. 四川地质学报, 38(2): 202-207+211.

严溶, 周汉文, 曾雯, 江麟生, 周忠友, 陈铁龙. 2006. 湖北宜昌崆岭群孔兹岩系地球化学特征[J]. 地质科技情报, 25(5): 41-46.

颜玲亚, 高树学, 陈正国, 焦丽香, 孙莉, 刘艳飞, 周雯. 2018. 中国石墨矿成矿特征及成矿区带划分[J]. 中国地质, 45(3): 421-440.

杨彪, 李成元, 薄海军, 侯秀宏, 苏攀云, 樊松浩. 2023. 内蒙古哈达门沟地区长汉沟晶质石墨矿床地球化学特征与成因研究[J]. 矿床地质, 42(2):444-462.

杨培奇, 刘敬党, 张艳飞, 梁帅, 赵越, 刘淑梅. 2017. 黑龙江佳木斯地块典型石墨矿床含矿岩石地球化学特征及成矿时代[J]. 中国地质, 44(2): 301-315.

叶云涛, 王华建, 翟俪娜, 周文喜, 王晓梅, 张水昌, 吴朝东. 2017. 新元古代重大地质事件及其与生物演化的耦合关系[J]. 沉积学报, 35(2): 203-216.

易承生. 2019. 湖北省石墨矿矿产特征及成矿规律[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 42(3): 361-369+386.

于吉林, 邱冬生. 2012. 河南省石墨成矿地质特征及远景预测[J]. 中国非金属矿工业导刊, 98(4): 60-62.

赵凤清, 赵文平, 左义成, 李宗会, 薛克勤. 2006. 陕南汉中地区新元古代岩浆岩U-Pb年代学[J]. 地质通报, 25(3): 383-388.

郑永飞. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社. 6-7.

周世泰. 1981. 恢复变质岩原岩的一种岩石化学方法[J]. 辽宁地质学报, 1(1):178-188.

周世泰. 1984. 对17种恢复变质岩原岩的岩石化学方法的检验结果[J]. 地质论评, 30(1):81-84.

朱立军, 赵元龙. 1996. 贵州台江中、下寒武统界线剖面微量元素地球化学特征[J]. 古生物学报, 35(5): 623-630.

http://www.kcdz.ac.cn/