

doi: 10.12029/gc20220109

张艳飞,安政臻,梁帅,翟富荣,张森,鞠楠,姜平,金秀英,肖荣阁. 2022. 石墨矿床分布特征、成因类型及勘查进展[J]. 中国地质, 49(1): 135–150.
Zhang Yanfei, An Zhengzhen, Liang Shuai, Zhai Furong, Zhang Sen, Ju Nan, Jiang Ping, Jin Xiuying, Xiao Rongge. 2022. Distribution characteristics, genetic types and prospecting progress of graphite deposits [J]. Geology in China, 49(1): 135–150(in Chinese with English abstract).

石墨矿床分布特征、成因类型及勘查进展

张艳飞^{1,2}, 安政臻², 梁帅¹, 翟富荣³, 张森¹, 鞠楠¹, 姜平⁴, 金秀英³, 肖荣阁⁵

(1. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁 阜新 123000; 3 辽宁省地质矿产研究院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110034; 4. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150086; 5. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要:【研究目的】石墨已成为新兴技术产业的重要原材料,也是未来高新技术发展的重要关键性矿产资源。中国既是石墨资源大国,也是生产消费大国,摸清石墨矿产资源分布现状,总结不同成因类型石墨矿床地质特征及成矿规律对保障石墨有效供给具有重要意义。【研究方法】搜集已公开发表或出版的石墨矿产资料,对石墨矿床地质特征、物质来源及成因等内容进行系统总结。【研究结果】石墨矿集区主要分布于东亚—南亚、东非、东欧—中欧、北美洲、南美洲和大洋洲等地,各矿集区资源禀赋、矿床成因及成矿地质特征各具特色。中国和东非的马达加斯加、莫桑比克、坦桑尼亚等国,近几年找矿成果显著,探获多处资源量达亿t级的石墨矿床;中国、莫桑比克、巴西为石墨矿主要生产国,2020年3国石墨产量约占总产量的80%。【结论】重新划分为区域变质型、热液型、岩浆型和接触变质型四大类石墨矿床,其中区域变质型、接触变质型、岩浆热液型及深成岩型石墨矿的碳质来源主要为有机质,而变质热液型和火成碳酸岩型石墨矿则以幔源岩浆碳为主。

关键词: 晶质石墨; 石墨矿床; 矿床类型; 矿产勘查工程

创新点: 基本摸清主要石墨矿集区石墨资源分布、成矿潜力和勘查找矿现状;重新划分石墨矿床成因类型,总结各成因类型石墨矿床碳质来源及成矿规律。

中图分类号:P619.252 文献标志码:A 文章编号: 1000-3657(2022)01-0135-16

Distribution characteristics, genetic types and prospecting progress of graphite deposits

ZHANG Yanfei^{1,2}, AN Zhengzhen², LIANG Shuai¹, ZHAI Furong³, ZHANG Sen¹, JU Nan¹,
JIANG Ping⁴, JIN Xiuying³, XIAO Rongge⁵

(1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, Liaoning, China; 2. Mining Institute, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China; 3. Liaoning Institute of Geology and Mineral Resources Co., Ltd, Shenyang 110034, Liaoning, China; 4. Harbin Comprehensive Survey Center of Natural Resources, China Geological Survey, Harbin 150086, Heilongjiang, China;

收稿日期:2021-06-09;改回日期:2021-10-12

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20190438)资助。

作者简介:张艳飞,男,1983年生,博士,正高级工程师,从事境外地质调查研究工作;E-mail:zhangyanfei1234@163.com

通讯作者:梁帅,男,1986年生,博士,高级工程师,主要从事区域地质调查与资源潜力评价工作;E-mail:ls476476@163.com。

5.School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Object] Graphite has become an important raw material for emerging technology industries, and It is also an important key mineral resource for future high-tech development. China is not only a big country of graphite resources, but also a big country of production and consumption. It is of great significance to find out the distribution status of graphite mineral resources and summarize the geological characteristics and metallogenic regularity of different genetic types of graphite deposits to ensure the effective supply of graphite. **[Methods]** Collect published or unpublished data of graphite minerals, and systematically summarize the geological characteristics, material sources and genesis of graphite deposits. **[Results]** Graphite mining areas are mainly distributed in East Asia-South Asia, East Africa, Eastern Europe-Central Europe, North America, South America and Oceania, and each mining area has its own characteristics in resource endowment, deposit genesis and metallogenic geological characteristics. China, Madagascar, Mozambique, Tanzania and other countries in East Africa, have achieved remarkable prospecting results in recent years, and many graphite deposits with resources of 100 million tons have been discovered. China, Mozambique and Brazil are the main producers of graphite ore, and the graphite output of these three countries will account for about 80% of the total output in 2020. **[Conclusion]** There are four types of graphite deposits: regional metamorphic type, hydrothermal type, magmatic type and contact metamorphic type. Among them, the carbon source of regional metamorphic type, contact metamorphic type, magmatic hydrothermal type and plutonic type graphite deposits is mainly organic matter, while that of metamorphic hydrothermal type and igneous carbonate type graphite deposits is mainly mantle magma carbon.

Key words: crystalline graphite; graphite deposit; deposit type; mineral exploration engineering

Highlights: Basically find out the distribution of graphite resources, metallogenic potential and prospecting status in major graphite ore concentration areas; Re-classify the genetic types of graphite deposits, and summarize the carbonaceous sources and metallogenic regularity of graphite deposits of various genetic types.

About the first author: ZHANG Yanfei, male, born in 1983, doctor, senior engineer, engaged in the survey and research of foreign geology; E-mail: zhangyanfei1234@163.com.

About the corresponding author: LIANG Shuai, male, born in 1986, doctor, senior engineer, engaged in regional geological survey and potentiality assessment of mineral resources; E-mail: ls476476@163.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20190438).

1 引 言

石墨是原子晶体、金属晶体和分子晶体之间的一种过渡型晶体,其与金刚石、碳纳米管、碳60等碳元素的单质互为同素异形体。石墨因其独特的耐高温性、导电导热性、化学稳定性、抗热震性与可塑性等,广泛应用于冶金、化工、高端装备制造、新能源、新材料等领域(安彤等, 2017; 周起忠等, 2019)。日本(2009年)、欧盟(2010年)、英国(2015年)、中国(2016年)、美国(2018年)、澳大利亚(2019年)、加拿大(2021年)等国家将石墨作为“关键性矿产”(王登红, 2019),并相继出台了有关晶质石墨发展的产业政策。石墨在现代材料工业、军工及高精尖技术发展中至关重要,被公认为“21世纪支撑高新技术发展的重要资源”(李超等, 2015; 安彤等, 2017)。本文通

过广泛搜集、整理国内外资料,对石墨矿床的分布、成因类型及典型矿床地质特征、勘查进展等方面进行总结,以深化对石墨矿床空间分布、地质特征的认识,把握石墨矿勘查开发趋势。

2 石墨矿床的时空分布特征

2.1 石墨资源分布概况

晶质石墨矿主要分布于亚洲的中国和斯里兰卡,欧洲的乌克兰、挪威和意大利,非洲的马达加斯加、津巴布韦、莫桑比克、坦桑尼亚和肯尼亚,南美洲的巴西,北美洲的加拿大(图1),其中莫桑比克和马达加斯加盛产大鳞片石墨,斯里兰卡盛产高品位的致密块状石墨(高照国等, 2018)。隐晶质石墨矿主要分布于亚洲的印度、朝鲜和土耳其,欧洲的俄罗斯、瑞士和奥地利,大洋洲的澳大利亚,北美洲的

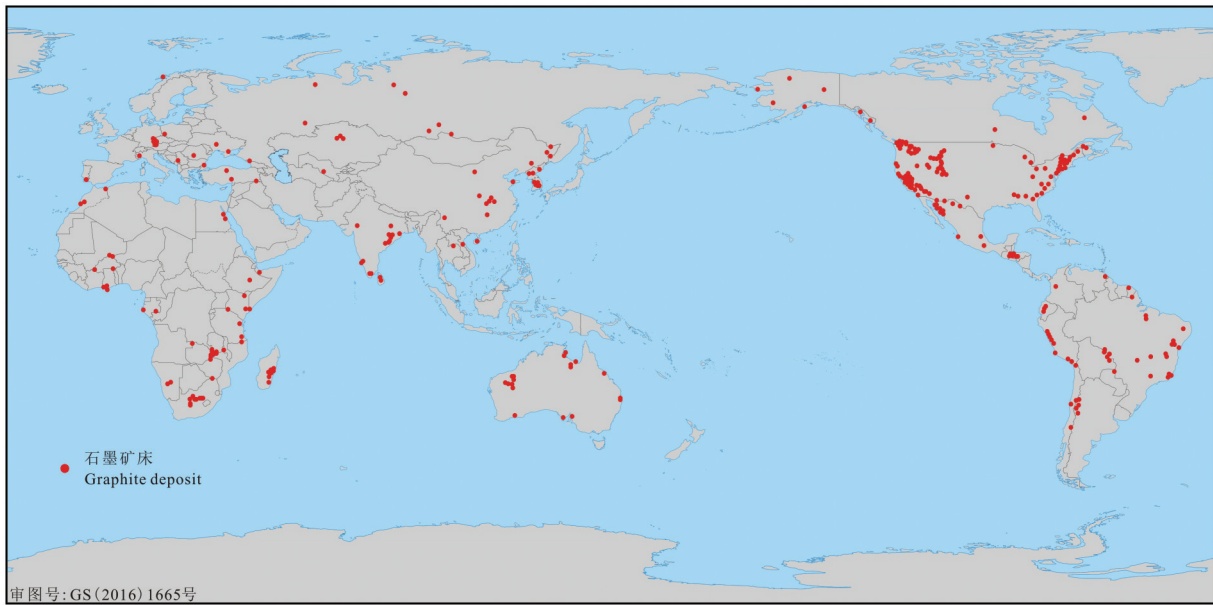


图1 主要石墨矿分布图

Fig.1 Distribution map of main graphite—ores
(<https://mrdata.usgs.gov/mrds/map-commodity.html#home>)

墨西哥等(图1)。已有地质资料表明,多数国家只产一种石墨,且矿床规模以中、小型居多,仅亚洲的中国、欧洲的捷克和斯洛伐克、北美洲的美国等极少数国家均有晶质和隐晶质石墨矿床产出,且矿床规模以大型为主。

2012年以前,探明石墨资源量在7000~9000万t。2012年之后,石墨成为国际勘探研究热点矿种(Hao et al., 2016),石墨矿产勘查开发力度不断加大,呈现出空前繁荣的勘探局面。2015年之后,探明石墨资源量呈现出快速增长的趋势。特别是近几年莫桑比克、坦桑尼亚和马达加斯加石墨资源增储迅速,且单个矿山资源量巨大(S&P Global Market Intelligence, 2021)。此外,意大利、美国、巴西、加拿大、肯尼亚和坦桑尼亚等国家均有晶质石墨产出,瑞士、朝鲜和美国等国家均有隐晶质石墨产出,但石墨矿床规模不大。目前,亚太地区是石墨供应市场份额最大的地区,2020年占世界市场的70%左右,其次是西欧、北美地区。

2.2 主要石墨矿集区概况

石墨矿集区主要集中分布于东亚—南亚、东非、东欧—中欧、北美洲、南美洲和大洋洲等地。

2.2.1 东亚—南亚石墨矿集区

石墨资源主要分布于中国、印度、朝鲜和斯里

兰卡等国家。中国石墨矿床主要分布于华北地块、扬子地块周缘、天山—兴蒙造山带和秦祁昆造山带,石墨矿产地分布广泛,矿石种类齐全,以晶质石墨为主,隐晶质石墨为次,而储量又相对集中于少数成矿最有利的地区。根据资源储量的多少,晶质石墨矿床依次分布于黑龙江、山东、内蒙古、山西、河南、四川、湖北和陕西等省(李超等, 2015; 蔡文春等, 2020; Duan et al., 2020; 李沅柏等, 2021),隐晶质石墨矿床主要分布于内蒙古、湖南、广东、吉林、陕西、山东和福建等省(图2)。中国晶质石墨资源丰富,整体呈现东北多西南少的格局,截至2019年底,已探明晶质石墨资源储量为5.29亿t,其中黑龙江、内蒙古和山东三省为晶质石墨矿主产地(中国矿产资源报告, 2020)。中国区域变质型石墨矿床的形成与前寒武纪中深变质岩系密切相关,主要成矿期为古元古代,变质程度从绿片岩相到麻粒岩相均有产出。热液型石墨矿床主要形成于石炭纪,由海西中期岩浆活动,在侵入过程中同化了石炭纪地层中含碳高的岩石,形成独特的球状晶质石墨矿床(张国新等, 1996; 刘松柏等, 2011; 颜玲亚等, 2018)。接触变质型石墨矿床主要形成于二叠纪—三叠纪,由燕山期—海西期中酸性岩体侵入含煤地层引起接触变质,煤层中的碳物质发生接触变质形成隐晶质石墨



图2 中国石墨矿床分布图
Fig.2 Distribution map of graphite deposits in China

矿床,变质程度主要为角岩相;接触变质型隐晶质石墨矿床成矿时代从晚古生代石炭纪、二叠纪至中生代侏罗纪,其中最重要的是晚二叠世及早侏罗世和晚侏罗世,北方以晚、早侏罗世及石炭纪的较多,南方以二叠纪为主。石墨成矿期和大地构造演化过程密切相关,主要包括中太古代—古元古代、中元古代—早寒武世、晚古生代—中生代三个重要成矿期,其中以中太古代—古元古代区域变质成矿期最为重要(李超等,2015;颜玲亚等,2018)。

印度石墨矿床多为煤或富碳沉积物变质而成,奥里萨邦、拉贾斯坦邦、普拉德邦、古吉塔邦和泰米尔纳德邦是石墨主要产地,其中奥里萨邦石墨产量占印度总产量的65%~75%(颜玲亚等,2014),奥瑞萨邦的石墨矿床赋存于寒武纪地层中,包括博兰吉尔—桑巴尔普尔、普尔巴尼—长拉汉迪和登卡纳尔3个矿带(Panigrahi et al., 2007),其中最大的甘若达

尔(Ganjaudar)矿床延伸达6.4~11.3 km,矿体厚120 m。朝鲜盛产细晶质石墨和隐晶质石墨,矿床主要分布于慈江道和咸镜道,咸镜道内的东方石墨矿是朝鲜最大的细晶质石墨矿床,石墨呈细鳞片状或致密块状分布于云母片岩和绿泥石片岩中(张苏江,2018)。斯里兰卡西部和西南部分布多个优质的晶质石墨矿床,矿体多呈脉状分布于太古宙片麻岩中,有的呈透镜状和囊状充填于大理岩中。

2.2.2 东非石墨矿集区

东非地区蕴藏着丰富的天然石墨资源,主要分布于马达加斯加、莫桑比克、坦桑尼亚、埃塞俄比亚和马拉维等国家(任军平等,2021)。马达加斯加是优质大鳞片石墨矿的重要产地之一,石墨由富碳地层经区域变质作用形成,呈浸染状赋存于火山岩、硅质沉积岩中,矿体产于云母片岩和云母片麻岩中(黄国平等,2014;安彤等,2017;王力等,2017),矿石

品位一般为3%~11%,少数为30%~40%,鳞片直径可达4 mm。马达加斯加从北东到南西划分为Bekily-Ampanihy、Ambatolampy-Fianarantsoa和Befandriana-Toamasina 3处石墨成矿带,成矿带近南北或北北东向展布,带内已发现矿产地17处、矿点37处,包括Ambahita、Ambohimandroso、Andasibe-Perinet、Antsirakamb、Marovintsy和Vohitasara等矿床(王奎良等,2020)。莫桑比克石墨资源丰富,石墨矿床赋存于基底变质岩中,主要分布于德尔加杜角(Cabo Delgado)省的安夸贝(Ancuabe)地区以及太特(Tete)省的安格尼亚(Angoia)地区,二者的地层均产于中元古代早莫桑比克期,前者岩性主要为斜长角闪片麻岩,后者岩性主要为高级片麻岩和石墨片麻岩,均为大鳞片晶质石墨(陈超等,2018)。安格尼亚石墨矿为赋存于中元古代安格尼亚群含石墨变质岩系地层中,严格受层位控制,含矿岩性主要为石墨黑云角闪斜长片麻岩和石墨斜长片麻岩,其变质相为片麻岩相—麻粒岩相,属于大鳞片晶质石墨矿,矿体产状由地表向深部变陡等特征。坦桑尼亚石墨矿床多数位于其中部和东南部地区,为最大的石墨生产国之一(白德胜等,2017),正在开采的石墨矿床包括马瑞拉尼(Marilani)和乞力马扎罗山(Kilimanjaro)等,此外还有很多处于勘查阶段的石墨矿床,如纳丘(Nachu)、奇拉洛(Chilalo)、纳曼加勒(Namangale)、马亨盖(Mahenge)等(罗清威等,2018;祁东等,2020)。

2.2.3 东欧—中欧石墨矿集区

石墨资源主要分布于乌克兰、捷克、俄罗斯、芬兰和奥地利等国家。乌克兰石墨矿床主要分布于克什提姆—穆尔津片麻岩中,查瓦里耶夫(Zavalievsky)石墨矿是已开采最大石墨矿床,矿石品位6%~7%(Schulz et al., 2017);波多果尔(Podogol)石墨矿床位于伊尔库茨克以西,东萨彦山脉中部,涉及矿体20余个。捷克南捷克州鳞片石墨矿床赋存于前寒武纪片麻岩、石英岩与碳酸岩中,矿石品位达15%;捷克的莫拉维亚地区微晶石墨矿床赋存于沉积变质岩中,矿石品位 $\geq 35%$ (张苏江等,2018)。俄罗斯克拉斯诺达尔边疆区(Krasnodarskiy Kray)的库列伊卡(Kureyka)和诺金斯克(Noginskoje)隐晶质石墨矿,储量分别为8700万t和1000万t,矿石品位85%~88%(Schulz et al., 2017)。

奥地利凯萨斯堡致密晶质石墨矿床,矿石品位40%~90%;特伦多夫—莫尔达夫石墨矿床,晶质石墨与微晶石墨共存,矿石品位45%~50%。德国博米安山丘帕绍石墨矿床,已发现矿层20余个,矿石品位10%~30%。瑞典Vittangi石墨矿床,其资源量1950万t,矿石品位24%;Jalkunen石墨矿床,其资源量3150万t,矿石品位15%;Nunasvaara石墨矿床,其资源量560万t,品位24.6%。芬兰中部Rautalampi和Käpysuo石墨矿床,东部Piippumäki和Kärpälä石墨矿床,其中后者是芬兰最大的石墨矿床(Palosaari et al., 2020)。

2.2.4 北美洲石墨矿集区

北美洲石墨资源主要分布于加拿大、美国和墨西哥等国家。加拿大石墨矿床分布于安大略省、不列颠哥伦比亚省、魁北克省和新不伦瑞克省。安大略省比塞特克里克(Bissett creek)石墨矿床是北美洲最大的石墨矿床,资源量5400万t,矿石品位1.9%,科尔尼(Kearney)石墨矿床资源量4800万t,矿石品位2.5%,波特兰德(Portland)石墨矿床,矿石品位6%;魁北克省刀湖石墨矿床资源量800万t,矿石品位16.7%,Lac Gueret石墨矿床资源量260万t,矿石品位15%~40%;不列颠哥伦比亚省库登奈山(Kootenay Mtns)石墨矿床,资源量670万t,矿石品位7%;新不伦瑞克省金格鲁夫(Golden Grove)石墨矿床,矿石品位高达32%;萨斯喀彻温省(Deep Bay East)和(Deep Bay West)大型鳞片石墨矿床,个别矿段最高品位达27.52%。墨西哥已发现的石墨矿床绝大多数为隐晶质石墨矿床,主要分布于索诺拉州、格雷罗州和伊达尔戈州,超大型高品质的隐晶质石墨矿床埃莫西约(Hermosillo)位于索诺拉州,矿体赋存于含煤的深灰红色石英岩之间,矿体厚7.3 m,平均品位为80%,最高可达95%。美国宾夕法尼亚州、密歇根州、加利福尼亚州和阿拉斯加州等10多个州均有石墨资源分布。2012年在锡沃德半岛发现大型鳞片石墨矿床,矿体地表出露长5 km,厚100 m,大鳞片高品质石墨赋存于黑云母石英片岩中,还有石墨透镜体,矿石品位高达60%。

2.2.5 南美洲石墨矿集区

南美洲石墨资源主要分布于巴西、智利、秘鲁等国。巴西石墨矿床分布于米纳斯吉拉斯州(Minas Gerais)、马托格罗索州(Mato Grosso)、塞阿拉

州(Ceara)和巴伊亚州(Bahia),品质最好的石墨分布于米纳斯吉拉斯州派德拉亚朱尔(Pedra Azul)矿床,探明资源量2.5亿t,矿石品位20%~25%,为巴西最大的石墨矿床;奥门纳拉(Almenara)石墨矿床,资源量5700万t,矿石品位4%~10%。马托格罗索州波斯波利斯(Persepolis)石墨矿床,资源量4000万t,矿石品位12%(Manoel et al., 2018; 张苏江等, 2018)。

2.2.6 大洋洲石墨矿集区

大洋洲石墨资源主要分布于澳大利亚(图3)。澳大利亚南部澳尤里(Uley)石墨矿床,资源量600万t,矿石品位11%;Munглиnup大鳞片石墨矿床,已探明和推测的资源量为800万t,矿石品位12.2%;澳苏格罗夫(Sugarloaf)鳞片石墨矿床,资源量为4000~7000万t,矿石品位10%~12%(张苏江等, 2018)。目前,Siviour石墨矿床为澳大利亚储量最大石墨矿,资源量8740万t,品位7.5%。

3 石墨矿床成因类型

石墨的形成与大地构造格局、富碳质沉积体系、变质作用、混合岩化作用等控矿因素密切相关,大地构造格局决定了晶质石墨矿床的有利区分布,富碳陆源碎屑沉积体系主控碳源供给和赋矿层位分布,变质作用程度及期次限定石墨矿体规模,混合岩化过程对提升矿石品质具有重要促进作用(王力等, 2017)。本次根据成矿作用过程、矿物组成、化学成分等特征,结合以往研究成果(张艳飞等, 2020a, b),将石墨矿床重新划分为区域变质型、热液型、岩浆型和接触变质型4种类型(表1)。

3.1 区域变质型石墨矿床

区域变质型晶质石墨矿床是最重要类型,在区域变质条件下,赋矿沉积岩中早期的含碳物质转化为石墨(Hoefsea al., 1976),大多数石墨矿床位于前

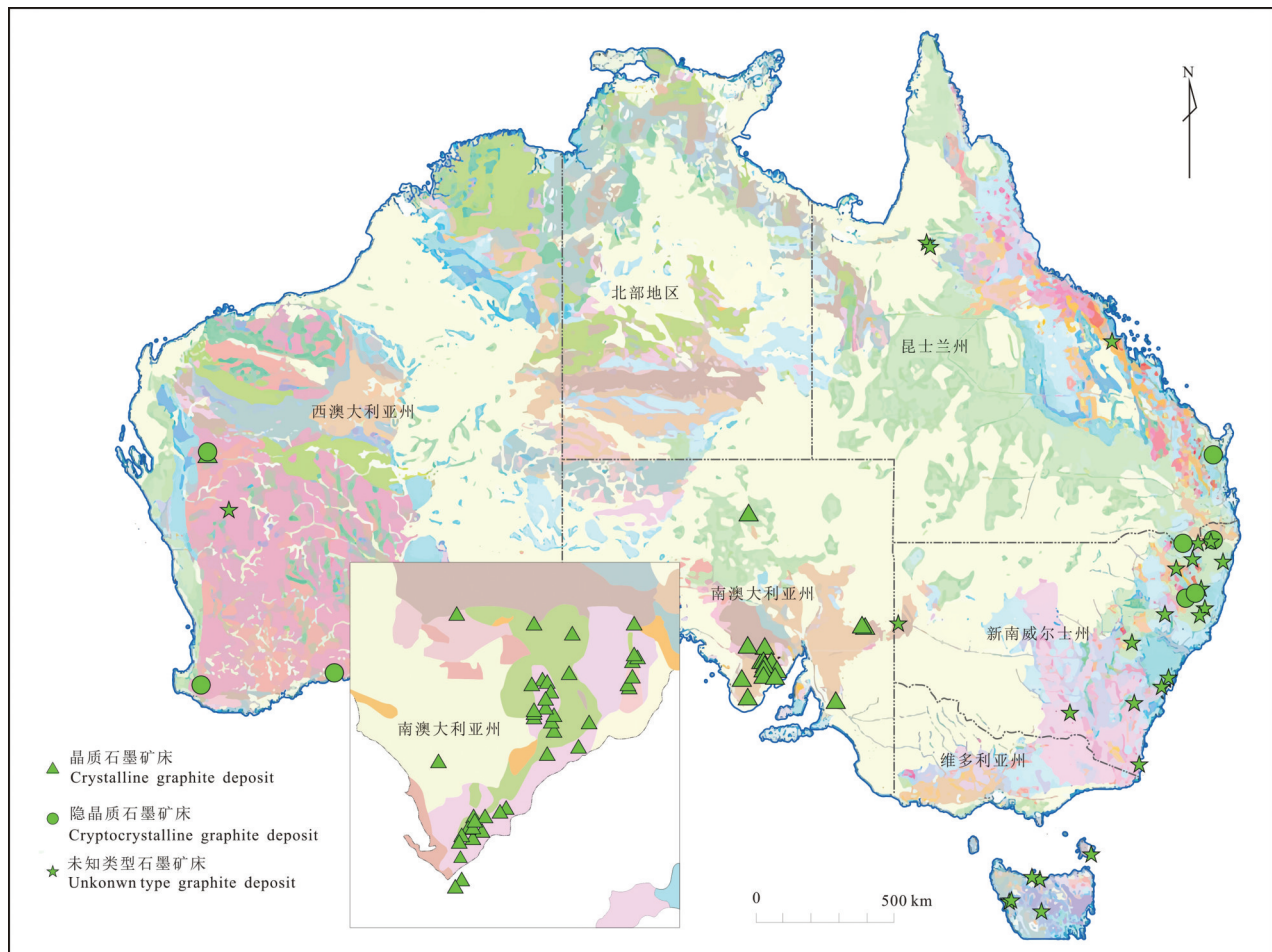


图3 澳大利亚石墨矿床分布

Fig.3 Distribution of graphite deposits in Australia

表1 石墨矿床成因类型划分
Table 1 Genesis classification of graphite deposits

矿床类型	沉积时代/ 侵位时代	变质时代/成矿时代	成矿区带/典型矿床	
区域 变质 型	中深变质型	古太古代—古元古代	古元古代、新元古代	成矿作用发生于陆块形成阶段的陆核区及其发展过程中的一些残块,矿体主要产于孔兹岩系,如北美地块,印度地块,东欧地块,中朝地块,南美地块,澳大利亚地块,非洲地块。中国黑龙江柳毛石墨矿,山东南墅石墨矿等
	浅变质型	中元古代—早寒武世	泛非—加里东期	成矿作用发生于地台基本形成并开始裂解的早期阶段,多见于褶皱隆起区。中国内蒙古大乌淀石墨矿,辽宁杜屯石墨矿等
热液 型	变质热液型	古元古代—新元古代	冈瓦纳超大陆拼合,泛非运动	印度成矿区,如印度南部 Kerala、Orissa 石墨矿,斯里兰卡卡拉塔加哈(Kahatagaha)、博加拉(Bogala)石墨矿等
	岩浆热液型	古生代—中生代	奥陶纪、侏罗纪	地中海成矿带,如英国 Borrowdale 石墨矿,西班牙 Huelma 石墨矿等
岩 浆 型	深成岩型	古元古代、晚古生代	古元古代、志留纪、石炭纪	特提斯成矿域,如西班牙南部 Ronda 和摩洛哥的 BeniBousera 石墨矿,中国新疆苏吉泉、黄羊山石墨矿等
	火成碳酸岩型	新元古代	震旦纪	印度成矿区,如索马里 Darkainle 石墨矿;欧洲成矿区,如俄罗斯 Pogranichnoe 石墨矿,乌克兰 Novopoltavskoe 石墨矿等
接 触 变 质 型	震旦纪—寒武纪 石炭纪—二叠纪	寒武纪—志留纪 侏罗纪—白垩纪	环太平洋成矿域及特提斯成矿域,如墨西哥索诺拉州石墨矿,中国江西长寿源石墨矿,中国湖南鲁塘石墨矿,中国新疆青河达布逊、孔可热石墨矿等	

寒武纪变质地层中(如孔兹岩系),主要为新太古代—元古代(Chacko et al., 1987),矿石类型主要为片麻岩型、片岩型、变粒岩型和大理岩型,进一步可划分为中深变质型和浅变质型。石墨的鳞片粒度与变质程度呈正比,结晶较好的鳞片石墨形成于角闪岩相或麻粒岩相,细鳞片结构的石墨形成于绿片岩相(李超等, 2015),石墨呈浸染鳞片状分布于火山岩、硅质沉积变质岩中,此类矿床石墨鳞片大,矿石质量高。高品位石墨通常与大理岩和副片麻岩或石英岩之间的岩石接触界面、断层带中的透镜体以及作为变质流体通道的构造有关,表明矿化受构造控制;尽管这些矿床中的大多数碳被认为存在于原始沉积岩中,但一些碳富集可能是由变质流体的内部或外部缓冲或混合过程引起(Lamb et al., 1984; Newton, 1986)。石墨矿床以层控透镜体或层的形式出现,矿床中的单个透镜体厚达数十米,长数百米,透镜体内部以及透镜体之间石墨含量都是可变的。典型矿床的矿石品位为8%~15%,而已发现的区域变质型石墨矿床矿石品位介于3%~60%,如马达加斯加一个富矿透镜体中含有60%的石墨,美国阿拉斯加基格鲁艾克山石墨矿区的石墨品位在某些地段超过50%(Coats, 1944)。在副片麻岩型矿床中,脉石(非矿石)矿物按丰度顺序依次为长石、黑云母、辉石、石榴石和硫化

物。石墨大理岩型矿床中的脉石矿物包括方解石、辉石、长石、石榴石和硫化物。

中国区域变质型石墨矿床主要形成于前寒武纪古陆内部相对稳定的华北地块和扬子地块以及吉黑、秦岭、祁连、华南、三江等褶皱系的隆起区,如分布于佳木斯隆起、胶辽断隆、内蒙古地轴、豫西断隆、山西断隆及康滇地轴等隆起区的大中型晶质石墨矿床,分布于黄陵背斜、龙门—大巴台缘褶皱带、秦岭地轴、淮阳地轴及武夷隆起区的以中、小型晶质石墨矿床(梁帅,2015;刘敬党等,2017)。石墨赋存层位主要为华北地块北缘的集宁群、乌拉山群,吉南—辽东地区的集安群、辽河群,佳木斯隆起的麻山群、兴东群,胶北隆起的荆山群、粉子山群,秦地区的秦岭群,豫西的太华群,龙门—大巴山地区的火地垭群,黄陵背斜的崆岭群等。石墨成矿时代北方主要为新太古代—新元古代,南方为新元古代—早寒武世。石墨成矿条件主要包括:一是一套含碳富铝泥质岩、泥砂质岩、石英砂岩和不纯碳酸盐岩所组成的沉积原岩(陈衍景等,2000;张天宇等,2014);二是中条旋回以前的构造旋回期及扬子—加里东构造旋回期的区域变质作用形成晶质石墨矿床;三是部分矿床发生混合岩化的情况下有些矿体可能遭受破坏,但部分矿体可在混合岩化过程中发生石

墨重结晶作用;四是后期多期次的断裂构造和岩浆对矿层有一定的切割破坏作用,宏观上制约着含石墨岩系的分布。区域变质型石墨矿床中石墨常呈浸染状分布于粉砂岩、硅泥质沉积岩中,主要发育片岩型、片麻岩型、大理岩型、变粒岩型和长英质型矿石。国内区域变质型矿床主要分布于黑龙江、山东、内蒙古、山西和四川等地,典型矿床如黑龙江鸡西柳毛石墨矿(矿石品位:平均9.7%,高达26.34%)。

非洲大陆除北部地区外,从前寒武纪起就是一个较为稳定的隆起地块,为早前寒武纪地质记录保存最好的地区,优越的成矿地质条件,蕴藏着丰富的区域变质型石墨矿床,已成为天然晶质石墨的主要产地之一,主要分布于莫桑比克、坦桑尼亚、马达加斯加和埃塞俄比亚等地,多为优质大鳞片石墨。莫桑比克区域变质型石墨矿主要分布在德尔加杜角省的安夸贝地区以及太特省的安格尼亚地区,呈矿带产出(陈超等, 2018);单个矿床储量规模巨大,资源量一般在几千万t至十几亿t左右;矿体主要分布于基底变质岩中,矿层单一,层位稳定;厚度3~18 m,延伸数十米到上千米;具有结晶好,品位高,鳞片大等特点,矿石品位6%~20%,属于易选矿石(焦玄等, 2016)。坦桑尼亚区域变质型石墨矿主要分布在坦桑尼亚东南6个成矿区带(罗清威等, 2018; 曹义甲等, 2019);单个矿床规模较大,资源量一般在千万t至几亿t;矿体主要分布于含石墨变质岩系中,矿层单一,层位稳定,厚度2~50 m,矿石品位5%~18%,属于易选矿石。马达加斯加区域变质型石墨矿分布较为集中,主要分布于东部的Marivolanitra地区及西南部的Analamateza地区(黄国平等, 2014),包括Bekily-Ampanihy、Ambatolampy-Fianarantsoa和Befandriana-Toamasina三个石墨成矿带(王奎良等, 2020),已查明石墨资源量约2亿t。埃塞俄比亚南部的寒武纪变质岩是Moyale石墨矿床的主体,含石墨单元由石英岩和石英长石云母片岩组成,通常形成延伸数百米的连续体,矿石品位和鳞片大小存在区域差异。

北美洲区域变质型石墨矿床主要分布于加拿大和美国。加拿大区域变质型石墨矿产于格林威尔地质省、魁北克省南部和安大略省东南部,与格林威尔地质省系列大理岩、片麻岩和伟晶岩有关的小型矿床产于纽约提康德罗加西北部和阿迪朗达

克山脉西部(Alling, 1918),典型矿床有Lac Knife、Matawinie、Bissett Creek、Montpellier等。Montpellier石墨矿床与Bissett Creek石墨矿床中浸染和“均匀分布”的特征不同,形成了大小不等的透镜体,出现在钙硅酸盐单元顶部,并作为富黑云母—矽线石片麻岩中的石墨透镜体;Montpellier和Bissett Creek的矿化代表高温变质期间富含有机物的同生石墨矿化(Taner et al., 2017),生物作用及变质流体共同促进石墨形成。美国区域变质型石墨矿主要分布于阿拉巴马州、阿拉斯加州和得克萨斯州,其中阿拉巴马州黏土库萨—奇尔顿石墨区的矿床产于阿什兰石英云母片岩中的两个平行层和透镜体中,矿石品位1%~5%(Pallister et al., 1948),岩层和透镜体厚度6~35 m以上,缓倾斜,产于一条北东走向的1~3 km宽的构造带中,延伸超过90 km。矿床风化深度达35 m;得克萨斯州Burnet Llano区的石墨矿床产于前寒武纪片岩—片麻岩中,矿石品位变化大(Needham, 1946; Schulz et al., 2017)。

3.2 热液型石墨矿床

热液型石墨矿床是岩体同化重熔了含碳地层,碳质在沸腾的岩浆中重结晶并发生滚动形成独特的石墨脉状构造(刘松柏等, 2011)。石墨多呈脉状充填于断裂裂隙或洞穴中,通常产于麻粒岩和火成岩中(Luque et al., 2014),相应形成麻粒岩型和火成岩型脉状石墨矿床,两种环境下的石墨矿床在矿体类型、矿物学、碳源和石墨沉积机制等方面存在显著差异,但是具有高纯度、高结晶度的特点。因为脉状石墨矿床是通过断裂构造系统输送的含碳流体(或熔体)沉积而成,其记录了碳通过地壳和地幔的迁移过程(Chamberlain et al., 1988)。

3.2.1 变质热液型石墨矿床

在麻粒岩相变质作用脱挥发分过程中产生了富含CO₂的流体,在区域同构造变形作用下,形成了与脉状石墨矿床共伴生的热液脉状石英、黄铁矿、伟晶岩和硅化。较著名的麻粒岩型脉状石墨矿床位于斯里兰卡的西部和西南部,矿体呈脉状分布于太古界宙片麻岩中,有的呈透镜状和囊状浸染状充填在大理岩透镜体中石墨矿体长达20 m,宽厚3~6 m,矿石具有品位高、鳞片大等特征。斯里兰卡西部Wanni和Highland杂岩边界15~30 km范围内,且大致与该边界平行展布的含石墨矿脉几乎都呈东西

走向(Touret et al., 2019), 向南陡倾, 延长从几米到75m不等, 厚度从几毫米到1 m。石墨矿脉穿切麻粒岩相岩石的片麻理, 并穿切大型向斜和背斜的轴面(Kehelpannala, 1999; Kehelpannala et al., 2001)。靠近石墨矿脉的围岩蚀变表现为岩石组构的完全或部分消失以及减压过程中形成的斜方辉石和斜长石, 这意味着脉状石墨在更低于减压的 $P-T$ 条件下形成的。斜长石出溶及在围岩蚀变带形成反条纹长石, 是斯里兰卡脉状石墨所特有, 在所有蚀变岩(包括蚀变基性岩)中都有发现(Kehelpannala, 1999; Dharmapriya et al., 2017)。石墨脉与围岩接触处的放射状微裂缝表明, 石墨脉形成最后阶段的流体压力足够高, 从而导致围岩破裂, 并向围岩中注入低盐度含水流体。与石墨矿脉共生的石英中大量低矿化度含水流体包裹体表明, 在石墨形成的最后阶段, 石墨与低矿化度富水流体处于平衡状态。博加拉(Bogala)石墨矿中薄层钙硅酸盐岩层的蚀变特征和已发表的石墨碳同位素数据均表明, 成矿的幔源物质占主导地位, 与少量表壳变质成因含碳富 CO_2 流体混合, 排除了脉状石墨成因中碳酸盐碳的参与(Kehelpannala, 1999; Hiroi et al., 2014)。

印度南部 Kerala 和 Orissa 地区麻粒岩中产出的热液脉状石墨矿床(Radhika et al., 1996; Sanyal et al., 2009; Luque et al., 2012, 2014)与斯里兰卡石墨矿床相似。在 Kerala 地区, 石墨多以浸染状赋存于麻粒岩中或韧性剪切带中或伟晶岩脉中(Soman et al., 1986; Radhika et al., 1996), 石墨与伟晶岩的共生关系表明, 高温石墨是在变质作用的峰期之后的熔融结晶过程中形成。石英、黄铁矿和磁黄铁矿是矿脉中最常见的脉石矿物。Zhang et al.(2019)报道了含石墨麻粒岩碎屑锆石 U-Pb 上交点年龄(2061 ± 39) Ma 和下交点年龄(539 ± 20) Ma, 其中一变质锆石显示 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为(563 ± 7.3) Ma, 说明峰期变质作用发生在新元古代晚期—寒武纪早期, 这些年龄与先前报道的印度南部孔兹岩带不同地区系的年龄数据相似(Santosh et al., 2003; Taylor et al., 2014; Kröner et al., 2015; Liu et al., 2016; Blereau et al., 2016)。

美国在新罕布什尔州、康涅狄格州、纽约州的阿迪朗达克山脉和蒙大拿州都有少量的麻粒岩型脉状石墨矿化点, 目前这些矿床仅具有科学研究意义。蒙大拿州狄龙(Dillon)石墨矿是美国最大的已

知脉型石墨矿床, 在片麻岩和伟晶岩的接触带出现了长 15 m、厚 60 cm 的石墨矿脉(Bastin, 1912), 构造和矿脉是在变质作用的峰期之后形成(Ford, 1954)。

3.2.2 岩浆热液型石墨矿床

火山岩型脉状石墨矿床是通过次火山主岩形成一种含碳流(熔)体, 流(熔)体中的碳来源于同化围岩中发生的脱挥发分反应。由于海底火山岩(枕状熔岩流)在喷发过程中急剧脱气, 因此在次火山岩类型(如岩床)中出现石墨矿脉的可能性更大。影响火山环境中石墨矿化的关键因素如下(Luque et al., 2012): 一是由于碳质变质沉积岩的同化作用, 岩浆中的碳含量异常高; 二是明显的脱气, 与次火山岩或浅成侵入体的存在有关, 作为流动的屏障; 三是含碳流体的出溶; 四是局部构造非均质性; 五是对沉积物的构造控制, 意味着超压、富矿流体更易于集中运移; 六是温度变化与流体流动和水化反应有关, 导致流体中的碳过饱和, 系统不平衡, 促进石墨沉淀。因此火山岩型石墨矿床的形成可以用自组织临界系统来解释。

英国 Borrowdale 火山岩型石墨矿床主要赋存在上奥陶统 Borrowdale 火山群的蚀变安山岩, 其下伏地层是 Skiddaw 群的低级变质泥质岩。石墨以 3 种形式出现: 一是沿断层交叉部位(横截面为 $1 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, 长度超过 100 m)的筒状体中的块状、结核状或球状石墨(通常直径 1~2 cm, 少数 10~15 cm, 甚至 1 m); 二是火山岩中的构造细脉, 绿泥石化较发育; 三是火山岩中的浸染状石墨。拉曼光谱的结构特征表明, 除硅酸盐颗粒周围的胶状石墨和寄主岩中的黄铁矿外, 所有的石墨形态都显示出很高的结晶度。微尺度 SIMS 研究揭示了石墨的稳定碳同位素比值($\delta^{13}\text{C} = -34.5\text{‰} \sim -30.2\text{‰}$)与 Borrowdale 火山群岩浆中含碳变泥质岩的同化作用相一致。石墨矿床在多方面都表现出一种独特的矿化类型, 多种地质因素相互作用促成了矿床的形成, 附近出现独特侵入体的 Burtness 活动断裂系统, 为 C-O-H 流体的流动提供了通道。根据流体包裹体数据, 该石墨矿床形成主要阶段的反应为 $\text{CO}_2 \rightarrow \text{C} + \text{O}_2$ (Ortega et al., 2010), 晚期富含 CH_4 的流体在 $\text{CH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2\text{O}$ 的反应后产生了较轻同位素特征石墨的连续沉淀(Barrenechea et al., 2009)。在主要矿化角砾岩管状体中, 同位素特征(隐晶质石墨比片状石墨轻)与从

流体包裹体数据推断的矿化流体的组成和演化一致,表明CO₂的逐渐流失。晚期石墨绿泥石脉中含有比片状石墨更重的球状石墨。这与矿化事件中该阶段的CH₄富集流体一致,导致同位素较重石墨形态的连续沉淀。因此,不同石墨形态的同位素变化可归因于流体中碳形态的变化,以及在石墨和相关含水矿物(主要是绿帘石和绿泥石)沉淀过程中伴随的XH₂O变化。

西班牙东南部 Huelma 的 Betic Cordillera 外带的火山岩型脉状石墨矿床,主岩为中侏罗世到晚侏罗世(155~170 Ma)被动大陆边缘玄武质岩床,上覆一层厚枕状熔岩,其中碳酸盐岩形成枕间互层,石墨矿化主要以裂隙充填脉的形式出现,尽管在两个或两个以上脉相互切割处观察到小结核和圆形到不规则的球状石墨体。矿脉的厚度从几毫米到 20 cm,结核的直径一般为 0.5~3 cm,而球状体的最大直径可达 25 cm(Barrenechea et al., 1997)。XRD 和拉曼光谱数据显示,石墨为高结晶,化学纯度较高(含量>90wt.%),一些矿化体既含有六方石墨,也含有亚微米石墨。碳同位素组成($\delta^{13}\text{C} = -23.0\text{‰} \sim -20.7\text{‰}$)和其他地质观察表明,石墨中的碳来自于变质基底中的有机质。Betic Cordillera 石墨矿脉矿化非常突出,它既具有高度结晶性(表明温度较高),又含有相当比例的菱形多面体(表明温度较低),同样在 Borrowdale 火山岩型石墨矿床中也发现了这些特征,在石墨样品中报告了高达 31.9% 的菱形多面体(Kwiecinska, 1980)。这些特征可能与石墨形成的具体过程有关,由于流体中固相的沉积涉及成核和晶粒生长,动力学因素可能会影响石墨的沉淀和物理性质。

3.3 岩浆型石墨矿床

岩浆型石墨矿床是属于与岩浆作用有关的石墨矿床,碳质在岩浆同化混染作用下达到饱和,并在硫化物的催化下沉积形成石墨。矿石具有典型的球状构造(刘松柏等, 2011),石墨与磁黄铁矿、黄铜矿等金属硫化物密切共生,常见的有深成岩型和火成碳酸岩型。

3.3.1 深成岩型石墨矿床

深成岩型石墨矿床多见于与中酸性—(超)基性岩浆岩有关的含石墨花岗岩、霞石正长岩、超基性—中基性杂岩体中,矿体实际就是石墨化的花岗岩、正长岩或超镁铁质岩等,矿石组成主要是晶质

石墨、长石、石英等,此外还有一系列次要矿物、副矿物及金属硫化物和丰富的稀土元素矿物。矿石品位一般较低,主要为 3%~6%。由于成矿作用的局限性,故其分布有限,仅产于中国、俄罗斯、日本、乌克兰、西班牙和摩洛哥等国家(Gellatly, 1966; Tsuchiya et al., 2008)。

中国新疆苏吉泉、西藏左贡青谷等地在花岗岩、闪长岩、辉长岩中看到类似的石墨混杂体。新疆奇台县黄羊山石墨矿床位于苏吉泉—吐尔库里晶质石墨成矿带上,赋矿岩性主要为细粒斑状含石墨混染花岗岩,石墨以晶质鳞片状产出。矿区出露的花岗岩属于高硅、低铝、贫钙镁、富碱的准铝质 A 型花岗岩,微量元素中的 Sm/Nd、La/Nb、Ba/Nb、Th/Nb 比值的范围表明,花岗岩的岩浆来源于壳—幔源岩浆混合,且洋壳残片物质为壳源岩浆组成部分。黄羊山石墨矿区 ①号和 ②号石墨矿体含石墨碱性花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 $(303.6 \pm 4.0) \text{ Ma}$ (MSWD=0.95, $n=20$) 和 $(304.6 \pm 3.7) \text{ Ma}$ (MSWD=0.39, $n=18$),表明该岩浆热液型石墨矿床含矿岩体成岩成矿时代均为晚石炭世晚期(白建科等, 2018; 艾江等, 2020)。前人测得的石墨矿中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-21.3\text{‰} \sim -23.9\text{‰}$,可以推断石墨矿的碳质来源为有机碳,属于海相或者陆相沉积物的有机质(Ai et al., 2020)。黄羊山岩浆型石墨矿成因机制可能为壳幔混合岩浆沿卡拉麦里大断裂上升侵位过程中,同化混染石炭纪含碳地层,在“沸腾”的岩浆中边结晶边滚动,形成具球状构造特征的岩浆型石墨矿床。

俄罗斯 Khanka 地体中 Primorye Lesozavodsk 地区的 Tamga 和 Turgenovo 大型矿床中,石墨以单矿物矿脉和透镜状包裹体的形式出现于中酸性岩浆岩和砂卡岩中,直径为 200 nm~2 mm,沿片麻岩和片岩的片理排列。研究表明 Khanka 地体中石墨主要来源于岩浆流体,但也有部分物质来源于外生和变质岩,具体包括:一是与地幔—地壳岩浆室有关的内生岩浆流体;二是与米特罗法诺夫卡组石墨—绢云母—石英页岩形成有关的外生沉积—化学成因来源;三是与区域变质作用中变质碳源。伊尔库茨克城西的波托果尔石墨矿,产于霞石正长岩的中心部位,共发现 20 余个矿体,呈巢状或株状,单矿体直径 2~25 m,长可达 50 m,石墨直径 0.25~1 mm,少量>3 mm,并有浸染状石墨,散布于霞石正长岩和硅灰

石砂卡岩中。有学者认为是由碳氢化合物形成的,碳氢化合物是硅灰石形成时岩浆气体与石灰石接触处释放的二氧化碳相互作用的结果(Gellatly, 1966)。印度 Sivamalai 的石墨以片状形式出现于片麻状黑云母—霞石正长岩中,含原生方解石和磁铁矿。

西班牙南部 Serranía de Ronda 和摩洛哥的 Beni Bousera 石墨矿床的超镁铁质赋矿岩体位于 Betic-Rifean 造山带中,该造山带在地中海阿尔卑斯造山带的最西端,岩体包括二辉橄榄岩和方辉橄榄岩,以及少量纯橄榄岩、不同类型的辉石岩层和浅色脉岩。石墨矿体以脉状、网脉状和不规则团块的形式出现,主要由石墨、铁—镍—铜硫化物等矿物组成,厚度从几厘米到几米,延伸数十米。软流圈衍生的熔体引起橄榄岩和辉石的部分熔融,产生残留熔体,由此形成石墨硫化物矿床。这些残留熔体浓缩了挥发性组分(主要是 CO_2 和 H_2O),以及 S、As 和亲铜元素。碳是通过含石墨的石榴石辉岩与软流圈熔体的熔岩反应掺入熔体中,富含石墨的石榴石辉岩是俯冲的洋壳以及富干酪根的地壳物质进入地幔的超高压变质作用的结果(Crespo et al., 2006; Atrassi et al., 2011)。大多数研究证实两个矿床中的石墨具有轻(生物)碳特征,而且局部存在球状石墨,其形成过程为熔体中的轻碳与富含 ^{13}C 的残余物(可能来自俯冲洋壳中的热液方解石脉)的反应或部分熔体反应,而形成同位素分区的球状石墨聚集体(Crespo et al., 2006)。因此, Beni Bousera 和 Serranía de Ronda 石墨的碳同位素研究即反映了地幔中的早期碳同化过程,也保留了原始的生物成因和无机成因碳同位素特征(Luque et al., 2014)。

3.3.2 火成碳酸岩型石墨矿床

石墨是从火成碳酸岩浆中沉淀出来的,石墨与方解石处于明显的平衡状态,典型矿床为俄罗斯 Pogranichnoe 白云石碳酸岩中的石墨(Doroshkevich et al., 2007)、索马里 Darkainle 白云石碳酸岩石墨(Gellatly, 1966)、乌克兰 Novopoltavskoe 碳酸岩中石墨(Zagnitko et al., 1980)。

俄罗斯北外贝加尔 Pogranichnoe 碳酸岩露头由一个东西向延伸的陡倾岩体组成,宽 30~100 m,长超过 450 m,矿物组成包括粒径 1~3 mm 铁白云石(50%~70%),粒径 3~5 mm 磁铁矿(10%~15%)和 1.5 mm 磷灰石(2%~10%)及少量霓石。含石墨白云石

碳酸岩年龄为 $(624\pm 3)\text{Ma}$,包含球状石墨和含方解石的白云石碳酸岩捕虏体。石墨形成单个球晶,偶见由 2~4 个球晶和罕见的片状颗粒组成,它位于白云石颗粒之间或内部,很少位于白云石和磁铁矿的边界或磁铁矿和磷灰石内。球晶的大小从 $<1\text{ mm}$ 到 1.5 mm,球晶形状为圆形,表面呈球状,有时等轴晶粒表现出相对清晰的晶体八面体。有些球晶的核心是颗粒状的,偶尔有含铁方解石和含钙菱铁矿。成分不同的细粒聚集体伴随着石墨和填充断裂带,球晶通常含有一个同心的碳酸盐带,有时含有细粒黄铁矿。在球晶的外部区域,石墨片晶垂直于球晶表面排列,有时球晶核部含有细粒含铁方解石的集合体(Doroshkevich et al., 2007)。

索马里 Darkainle 杂岩的几个碳酸岩岩体中也含有少量球状石墨,石墨球晶约 0.1 mm,这一小规模碳酸岩体在杂岩中形成一个整合透镜体,断续延长 100 m,最大厚度 3 m,与杂岩接触带明显。

3.4 接触变质型石墨矿床

接触变质型石墨矿床是隐晶质石墨矿床的重要类型和隐晶质石墨的主要来源,是由煤、油气藏或其他高含碳沉积岩的热变质作用形成的土状或致密的微晶石墨,矿床往往产于煤层和其他富含有机质的沉积岩(如油页岩)环境中,构造背景包括被动大陆边缘的海岸线、河流三角洲和冲积扇,以及湖泊、浅内海和前陆、大陆、拗陷或陆内裂谷盆地的边缘。由于基性—中酸性岩浆侵入,围岩发生不同程度的变质作用,如硅化、砂卡岩化、绿泥石化等及与热变质作用有关的角岩化、大理岩化等。石墨矿体大多产出于侵入岩体外接触带或附近断裂带,石墨矿石类型有板岩型、片岩型、大理岩型、千枚岩型及煤变质型。煤系石墨矿床矿石品位一般为 50%~90%,其矿石品位、规模和纯度取决于早期煤层或含碳物质的特征。变质块状煤层中石墨矿石品位可高达 90%,而其他含碳沉积物或不纯煤序列中的石墨矿石品位为 25%~60%(Schulz et al., 2017)。

接触变质型石墨矿床分布广泛,亚洲地区主要分布于中国、印度、韩国、日本、朝鲜及俄罗斯西伯利亚,欧洲地区以奥地利、俄罗斯为主要产地,北美洲地区则以墨西哥索诺拉州、格雷罗州和伊达尔戈州为主(Schulz et al., 2017; 张苏江等, 2018)。此外,在非洲的部分地区和澳大利亚有一定数量的煤系石墨

矿床。印度石墨矿床多为煤或富碳沉积物的接触变质石墨矿床,主要分布于奥瑞萨邦和拉贾斯坦邦,奥瑞萨邦的石墨矿床有博兰吉尔—桑巴尔普尔、普尔巴尼—长拉汉迪和登卡纳尔3个石墨矿带,其中很多的矿床延伸达6.4~11.3 km,矿体厚120 m。墨西哥的索诺拉州埃莫西诺市索诺拉接触变质型石墨矿床是西半球最重要的石墨矿床,矿石品位一般超过75%。美国罗德岛纳拉甘塞特盆地的煤矿和北密歇根州的矿床中也有发现,在新墨西哥州的拉顿出现玄武岩岩墙与煤层相交的独特现象(Schulz et al., 2017)。另外澳大利亚、朝鲜、俄罗斯等国也均有接触变质型石墨矿床分布(Khanchuk et al., 2015)。

中国接触变质型石墨矿床的形成年代多为晚古生代石炭纪—二叠纪,其形成机理主要为煤系沉积地层中的有机质受岩浆热液作用而发生的变质作用。矿床多见于活动大陆边缘,石墨矿体往往产于岩浆岩外围,地层中的有机质受岩浆热液烘烤在一定压力条件下形成石墨。但因变质时间相对较短和高温低压的变质条件,故变质程度相对较低。矿体主要为板岩、千枚岩型矿石,矿石呈土状,无光泽,润滑性差,矿石品位60%~80%,少数超过90%,矿石可选性差。中国接触变质型石墨矿床主要分布于内蒙古、湖南、广东、吉林和陕西等地,典型矿床如湖南郴州鲁塘接触变质型石墨矿床。

4 石墨资源勘查进展

4.1 中国石墨资源勘查进展

中国石墨资源成矿地质条件优越,资源潜力巨大,主要分布于黑龙江、内蒙古、四川、山西、山东、河南和新疆等省(区)。近些年来,中国各地政府加大了对石墨的勘查投入,特别是黑龙江、内蒙古和河南等省份在石墨项目勘查立项和资金投入方面均走在前列。2011—2020年期间,晶质石墨十年新增资源量为3.36亿t,约占新中国成立以来查明总量的65%。2015年以来,中国大型、超大型石墨矿床勘探成果丰硕,例如超大型矿床有黑龙江林口西北楞石墨矿床已探明碳矿物量达3500万t以上、双鸭山西沟石墨矿床碳矿物量2300万t以上;内蒙古乌拉特中旗大乌淀石墨矿床探明晶质石墨碳矿物量1776万t;内蒙古阿拉善右旗查汗木胡鲁石墨矿床探明晶质石墨碳矿物量700余万t。据自然资源部

发布的《2019年全国地质勘查成果通报》,新发现石墨矿产地7处(大型5处、中型2处),2019年完成阶段性勘查的矿产地14处(普查11处、详查1处、勘探2处),新增推断资源量6072万t。

4.2 非洲石墨资源勘查进展

近些年,坦桑尼亚、莫桑比克、马达加斯加、马拉维等国家加大石墨勘查力度,陆续发现一批大型、超大型石墨矿床,取得较好的找矿成果(S&P Global Market Intelligence, 2021)。2018年底,坦桑尼亚政府才开始重新审批采矿许可证,多个石墨项目获得了许可。坦桑尼亚近年石墨矿勘查取得重大突破,2020年3月江苏省地质工程有限公司在坦桑尼亚林迪地区发现一处大型优质大鳞片晶质石墨矿床,新增晶质石墨资源量165万t。目前在坦桑尼亚开发鳞片石墨的公司中,许多都已经完成了项目可行性研究,其中包括EcoGraf(Epanko 矿山)、Magnis Energy Technologies(Nachu 矿山)、Walkabout Resources(Lindi Jumbo 项目)、Black Rock Mining(Mahenge 矿山)、Marvel Gold(Chilalo 矿山)、Armada Capital(Mahenge Liandu 项目)和 Volt Resources(Bunyu 项目)。2017年,特里顿矿产公司(Triton Minerals)在莫桑比克安夸贝(Ancuabe)石墨资源量增长59%,储量达4400万t,平均品位为6.6%。近年来中国地勘单位在马达加斯加先后发现了Beforona大型石墨矿床和Ambahita特大型石墨矿床(马金虎等,2020;王奎良等,2020)。2020年,马拉维中部Malingunde地区的Kasiya矿区完成了石墨勘查,发现多个石墨矿床(点)。

4.3 欧洲石墨资源勘查进展

2020年,瑞典北部的维坦吉(Vittangi)石墨项目储量增加将近一倍,资源量达到470万t,矿石平均品位为24%。挪威Skaland石墨公司的Traelen石墨矿床经过近年勘探获得资源量178万t,矿石平均品位为22%。2019年10月,芬兰Haapamaki石墨矿床最新JORC资源估算,基于3%边界品位,资源总量为2670万t,平均品位为4.8%(S&P Global Market Intelligence, 2021)。

5 结 论

(1)石墨资源具有分布广泛、相对集中的特点,石墨矿集区主要分布于东亚—南亚、东非、东欧—

中欧、北美洲、南美洲和大洋洲等地。晶质石墨矿主要分布在中国、巴西、马达加斯加、莫桑比克、澳大利亚等国,隐晶质石墨矿主要蕴藏在土耳其、印度、墨西哥等国。石墨已广泛应用于传统工业和高新技术产业,也是未来高科技发展的关键性矿产。

(2)根据成矿作用过程、矿物组成、化学成分等特征,重新厘定为区域变质型、热液型、岩浆型和接触变质型4种类型,其中区域变质型、接触变质型、岩浆热液型及深成岩型石墨矿的碳质来源主要为有机质,而变质热液型和火成碳酸岩型石墨矿则以幔源岩浆碳为主。

(3)石墨矿勘查进展方面,中国和东非马达加斯加、莫桑比克、坦桑尼亚等国,近几年找矿成果显著,探获多处资源量达亿t级的石墨矿床,且储量大、易开采、成本低。

致谢:审稿专家和编辑老师对文章提出了宝贵的意见和建议,在此表示衷心感谢。

References

- Ai Jiang, Lü Xinbiao, Li Zuowu, Wu Yalun. 2018. A super-large graphite deposit discovered in granite rocks at Huangyangshan, Xinjiang, China[J]. *China Geology*, 1, 164–166. doi: 10.31035/cg2018016.
- Ai Jiang, Lü Xinbiao, Li Zuowu, Wu Yalun. 2020. Geological characteristics and diagenetic geochronology of the Huangyangshan graphite deposit[J]. *Geology in China*, 47(2):334–347(in Chinese with English abstract).
- Alling H L. 1918. The Adirondack Graphite Deposits[M]. Albany, N. Y., New York State Museum Bulletin, 152.
- An Tong, Li Jianwu. 2017. Analysis of the present supply–demand situation and the trend of global graphite resource[J]. *China Mining Magazine*, 26(9):11–15, 20(in Chinese with English abstract).
- Atrassi F E L, Brunet F, Bouybaouene M L, Chopin C, Chazot G. 2011. Melting textures and microdiamonds preserved in graphite pseudomorphs from the Beni Bousera peridotite massif, Morocco[J]. *European Journal of Mineralogy*, 23(2):157–168.
- Bai Jianke, Chen Junlu, Peng Suxia. 2017. Characteristics and metallogeny regulation of graphite resources in Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 12(91): 2828–2840(in Chinese with English abstract).
- Bai Jianke, Chen Juanlu, Peng Suxia. 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).
- Barrenechea J F, Luque F J, Rodas M, Pasteris J D. 1997. Vein-type graphite mineralization in Jurassic volcanic rocks of the external zone of the Betic Cordillera (southern Spain) [J]. *The Canadian Mineralogist*, 35:1379–1390.
- Barrenechea J F, Luque F J, Millward D, Ortega L, Beyssac O, Rodas M. 2009. Graphite morphologies from the Borrowdale deposit (NW England, UK): Raman and SIMS data[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158:37–51.
- Bastin E S. 1912. The graphite deposits of Ceylon, with a description of a similar graphite deposit near Dillon, Montana[J]. *Economic Geology*, 7:419–443.
- Blereau E, Clark C, Taylor R, Johnson T, Fitzsimons I, Santosh M. 2016. Constraints on the timing and conditions of high-grade metamorphism, charnockite formation and fluid–rock interaction in the Trivandrum Block, southern India[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 34(6):527–549.
- Cai Wenchun, Zeng Zhongcheng, Song Shuguang, Li Jingchen, Wu Hao, Chen Yan. 2020. Geological characteristics and genesis of the Xianghe crystalline graphite deposit in Shangnan County of Shaanxi Province[J]. *Northwestern Geology*, 53(3): 220–232.
- Cao Yijia, Qi Dong, Zhang Dongxia, Chai Lijie, Jiao Yang. 2019. Geochemical characteristics and metallogenic study of the Bambarawe graphite deposit in Morogoro, Tanzania[J]. *Mineral Exploration*, 10(2): 333–343(in Chinese with English abstract).
- Chacko T, Kumar G R R, Newton R C. 1987. Metamorphic *P–T* conditions of the Kerala (South India) khondalite belt, a granulite facies supracrustal terrain[J]. *The Journal of Geology*, 95(3):343–358.
- Chen Chao, Li Taisheng, Wang Ru. 2018. Geological Characteristics and prospecting criteria of graphite deposit in the Angónia District, Tete Province of Mozambique[J]. *Resources Environment & Engineering*, 32(3): 379–381, 429(in Chinese with English abstract).
- Chen Yanjing, Liu Congqing, Chen Huayong, Zhang Zengjie, Li Chao. 2000. Carbon isotope geochemistry of graphite deposits and ore-bearing khondalite series in North China implications for several geoscientific problems[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(2):233–244 (in Chinese with English abstract).
- Coats R R. 1944. Graphite Deposits on the North Side of the Kigluak Mountains, Seward Peninsula, Alaska[J]. *U.S. Geological Survey Open-File Report*, 10:8.
- Crespo E, Luque F J, Rodas M, Wada H, Gervilla F. 2006. Graphite sulfide deposits in Ronda and Beni Bousera peridotites (Spain and Morocco) and the origin of carbon in mantle-derived rocks[J]. *Gondwana Research*, 9(3):279–290.
- Dharmapriya P L, Malaviarachchi S P, Kriegsman L M, Galli A, Sajeev K, Zhang C. 2017. New constraints on the *P–T* path of HT/UHT metapelites from the Highland Complex of Sri Lanka[J]. *Geoscience Frontiers*, 8:1405–1430.
- Doroshkevich A G, Wall F, Ripp G S. 2007. Magmatic graphite in

- dolomite carbonatite at Pogranichnoe, North Transbaikalia, Russia[J]. *Contributions to Mineralogy Petrology*, 153:339–353.
- Duan Lian, Wei Youfeng, Liu Qiyao, Yang Xiaoyong. 2020. Discovery of the Dahongshan ultra-large crystalline graphite deposit, Urad Zhongqi of Inner Mongolia[J]. *China Geology*, 3: 182–183. doi: 10.31035/cg2020019.
- Ford R B. 1954. Occurrence and origin of the graphite deposits near Dillon, Montana[J]. *Economic Geology*, 49:31–43.
- Gao Zhaoguo, Liu Hongzhao, Yang Huipeng, Cao Yaohua, Zhang Bo, Wang Hongliang, Wang Wei. 2018. General distribution and demand-supply tendency for worldwide graphite resources[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, (3):26–29(in Chinese with English abstract).
- Gellatly D C. 1966. Graphite in Natural and Experimental Carbonate Systems[J]. *Mineralogical Magazine*, 35(275): 963–970.
- Hao Ziguang, Fei Hongcai, Hao Qingqing, Liu Lian. 2016. “Three Rare Mineral Resources” and crystalline graphite have become prospecting focuses in China[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 90(5):1905–1906.
- He Liang, Dai Shunjun, Shao Rui, Du Qiu, De Yang, Zhaxi Pingcuo, Zunzhu Sangmu, Basang Duoji, Zhang Qizhi. 2020. Ore-Bearing Granite Age and Genesis of Diguoguo Large-Scale Graphite Deposit in Leiwuqi-Zuogong Metallogenic Belt, Eastern Tibet[J]. *Earth Science*, 45(8):2932–2944(in Chinese with English abstract).
- Hiroi Y, Yanagi A, Kato M, Kobayashi T, Prame B, Hokada T, Satish-Kumar M, Ishikawa M, Adachi T, Osanai Y, Motoyoshi Y, Shiraishi K. 2014. Supercooled melt inclusions in lower-crustal granulites as a consequence of rapid exhumation by channel flow[J]. *Gondwana Research*, 25(1):226–234.
- Hoefs J, Frey M. 1976. The isotopic composition of carbonaceous matter in a metamorphic profile from the Swiss Alps[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40:945–951.
- Huang Guoping, Hu Qingle, Chen Dongming, Li Liang, Zhang Zhong, Zhu An'an, Xu Haibo. 2014. General situation of geology and mineral resources in Madagascar[J]. *Resources Environment & Engineering*, 28(5):626–632(in Chinese with English abstract).
- Jiao Xuan, Qiu Yangshuai, Zhang Lingyan, Guan Junfang, Ouyang Zhijun. 2016. Experimental Research on Beneficiation of Graphite in Nicanda Hill of Mozambique[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 35(6):1940–1945, 1957(in Chinese with English abstract).
- Kehelpannala K W. 1999. Epigenetic vein graphite mineralization in the granuliteterrain of Sri-Lanka[J]. *Gondwana Research*, 4:654–657.
- Kehelpannala K W, Francis M D L. 2001. Vein graphite deposits of the Kegalle District, Sri Lanka: further evidence for post-metamorphic, fluid-deposited graphite[J]. *Gondwana Research*, 4: 655–656.
- Khanchuk A I, Plyusnina L P, Berdnikov N V. 2015. Noble metal and graphite formation in metamorphic rocks of the Khanka terrane, Far East Russia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 99:30–40.
- Kröner A, Santosh M, Henger E, Shaji E, Geng H, Wong J, Xie H, Wan Y, Shang C K, Liu D, Sun M, Nanda-Kumar V. 2015. Palaeoproterozoic ancestry of Pan-African high-grade granulites in southernmost India: Implications for Gondwana reconstructions[J]. *Gondwana Research*, 27(1):1–37.
- Lamb W, Valley J W. 1984. Metamorphism of reduced granulites in low-CO₂ vapor free environment[J]. *Nature(London)*, 312(1):56–58.
- Li Chao, Wang Denghong, Zhao Hong, Pei Haoxiang, Li Xinwei, Zhou Limin. 2015. Minerogenetic regularity of graphite deposit in China[J]. *Mineral Deposits*, 34(6):1223–1236(in Chinese with English abstract).
- Li Yuanbai, Yang Xinjie, Wang Yanyun, Wang Lei, Li Shucai. 2021. Discussion on genetic types and prospecting markers of graphite deposits in Ulan Area of Inner Mongolia[J]. *Northwestern Geology*, 54(2): 227–238.
- Liang Shuai. 2015. Genesis Studies of Typical Crystalline Graphite Deposits, in the North China[D]. Fuxin:Liaoning Technical University(in Chinese with English abstract).
- Liu Jingdang, Xiao Rongge, Zhang Yanfei, Liang Shuai, Zhao Qing, Bai Fengjun, Zhang Yongxing, Wang Jichun, Yang Peiqi, Liu Jian. 2017. The Crystalline Graphite Deposit in North China[M]. Beijing: Science Press, 300–328(in Chinese).
- Liu Songbai, Yang Meizhen, Wu Hong'en, Zhao Wenping, Zhang Lianlian. 2011. Metallogenic model of graphite deposit from Sujiquan, Eastern Junggar[J]. *Xinjiang Geology*, 29(2): 178–182 (in Chinese with English abstract).
- Luo Qingwei, Zhang Kechuan, Qin Deyou, Quan Cheng. 2018. Geological characteristics and prospecting potential of graphite deposit in Tanzania[J]. *Resources Environment & Engineering*, 32 (1):51–54, 73(in Chinese with English abstract).
- Luque F J, Crespo F E, Barrenechea J F, Ortega L. 2012. Carbon isotopes of graphite: Implications on fluid history[J]. *Geoscience Frontiers*, 3(2):197–207.
- Luque F J, Huizenga J M, Crespo F E, Wada H, Ortega L, Barrenechea J F. 2014. Vein graphite deposits: geological settings, origin, and economic significance[J]. *Mineralium Deposita*, 49(2): 261–277.
- Ma Jinhu, Liu Yang, Ma Xiaohui, Ti Yunsheng, Ma Yuwei, Zhao Gan, Zhang Xiangning, Zhang Jian, Li Yanxiang, Zhao Liang. 2020. Geological characteristics and genetic analysis of graphite deposits in Madagascar[J]. *Geology and Exploration*, 56(4): 878–888(in Chinese with English abstract).
- Manoel T N, Leite J D. 2018. On the origin of the Neoproterozoic Peresopolis graphite deposit, Paraguay Belt, Brazil[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 84:104–112.
- Ministry of Natural Resources, PRC. 2020. China Mineral Resources 2020[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).

- Needham A B. 1946. Mining and Milling Operations of Southwestern Graphite Co., Burnet County, Texas[R]. U.S. Bureau of Mines Information Circular, 7339: 7.
- Newton R C. 1986. Fluids of Granulite Facies Metamorphism, in Walther J Vand Wood B Jeds, Fluid-Rock Interactions during Metamorphism[J]. Berlin, Springer, 5:36-59.
- Ortega L, Millward D, Luque F J, Barrenechea J F, Beyssac O, Huizenga J M, Rodas M, Clarke S M. 2010. The graphite deposit at Borrowdale (UK): A catastrophic mineralizing event associated with Ordovician magmatism[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74:2429-2449.
- Pallister H D, Thoenen J R. 1948. Flake graphite and vanadium investigations in Clay, Coosa, and Chilton Counties, Alabama[J]. U. S. Bureau of Mines Report of Investigations, 4366:81.
- Palosaari J, Latonen R M, Smatt J H, Raunio S, Eklund O. 2020. The flake graphite prospect of Piippumäki—an example of a high-quality graphite occurrence in a retrograde metamorphic terrain in Finland[J]. *Mineralium Deposita*, 55:1647-1660.
- Qi Dong, Zhang Dongxia, Cao Yijia, Chai Lijie, Chen Lulu, Huang Da. 2020. Contrastive study on Bambarawe graphite deposit in Tanzania with graphite deposits in typical areas of China[J]. *Resources Environment & Engineering*, 34(1):36-40(in Chinese with English abstract).
- Radhika U P, Santosh M. 1996. Shear-zone hosted graphite in southern Kerala, India: implications for CO₂ infiltration[J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 14(3/4):265-273.
- Ren Junping, Hu Peng, Wang Jie, Wang Jianxiong, Zhang Hang, Liu Jiangtao, Liu Xiaoyang, Zeng Guoping, Sun Kai, Jiang Junsheng, Gu Alei, Cheng Xiang, Chen Junqiang, Zhao Kai, Wu Xingyuan. 2021. Mining development status of Africa[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(4):945-961.
- Santosh M, Yokoyama K, Biju S S, Rogers J J W. 2003. Multiple tectonothermal events in the granulite blocks of southern India revealed from EPMA dating: Implications on the history of supercontinents[J]. *Gondwana Research*, 6(1):29-63.
- Sanyal P, Acharya B C, Bhattacharya S K, Sarkar A, Agrawal S, Bera M K. 2009. Origin of graphite, and temperature of metamorphism in Precambrian eastern Ghats Mobile Belt, Orissa, India: A carbon isotope approach[J]. *Journal of Asia Earth Sciences*, 36:252-260.
- Schulz K J, De Young J H, Seal R R, Bradley D C. 2017. Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply[R]. U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, 797.
- Soman K, Lobzova R V, Sivadas K M. 1986. Geology, genetic types, and origin of graphite in south Kerala, India[J]. *Economic Geology*, 81:997-1002.
- Sun Li, Xu Cuiping, Xiao Keyan, Zhu Yusheng, Yan Lingya. 2018. Geological characteristics, metallogenic regularities and the exploration of graphite deposits in China[J]. *China Geology*, 1: 425-434. doi: 10.31035/cg2018044.
- Taner M F, Drever C, Yakymchuk C, Longstaffe F J. 2017. Origin of Graphite in the Southwestern Grenville Province[J]. *The Canadian Mineralogist*, 55(6):1041-1055.
- Taylor R J M, Clark C, Fitzsimons I C W, Santosh M, Hand M, Evans M, McDonald B. 2014. Post-peak, fluid-mediated modification of granulite facies zircon and monazite in the Trivandrum Block, southern India[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 168: 1-17.
- Tsuchiya N, Suzuki S, Chida T. 2008. Origin of graphite in the Oshirabetsu gabbroic body, Hokkaido, Japan[J]. *Journal of Mineralogical & Petrological Sciences*, 86(6):264-272.
- Touret J L R, Huizenga J M, Keheipannala K V W, Piccoli F. 2019. Vein-type graphite deposits in Sri Lanka: The ultimate fate of granulite fluids[J]. *Chemical Geology*, 508:167-181.
- Wang Denghong. 2019. Study on critical mineral resources: significance of research, determination of types, attributes of resources, progress of prospecting, problems of utilization, and direction of exploitation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(6):1189-1209(in Chinese with English abstract).
- Wang Kuiliang, Wu Datian, Xu Fengming. 2020. Geological characteristics and resource potential of graphite deposits in Madagascar[J]. *Geology and Resources*, 29(5): 435-445, 410(in Chinese with English abstract).
- Wang Li, Fan Junlei, Li Lei, Kang Lei. 2017. Graphite resource and metallogenic regularities of crystalline graphite in China[J]. *Journal of Geology*, 41(2):310-317(in Chinese with English abstract).
- Yan Lingya. 2014. Graphite Resources, Consumption and International Trade in the World[J]. *China Non-metallic Minerals Industry*, 2: 33-36(in Chinese with English abstract).
- Yan Lingya, Gao Shuxue, Chen Zhengguo, Jiao Lixiang, Sun Li, Liu Yanfei, Zhou Wen. 2018. Metallogenic characteristics and metallogenic zoning of graphite deposits in China[J]. *Geology in China*, 45(3):421-440(in Chinese with English abstract).
- Zagnitko V N, Lugovaya I P, Proskurko L I. 1980. Features of graphite from Ukraine on isotopic data (in Russian)[J]. *Abstracts of Soviet-Union Symposium on Stable Isotopes in Geochemistry*, 314-315.
- Zhang Cun, Santosh M. 2019. Coupled Laser Raman spectroscopy and carbon stable isotopes of graphite from the khondalite belt of Kerala, Southern India[J]. *Lithos*, 334-335:245-253.
- Zhang Guoxin, Hu Aiqin, Zhang Hongbin, Zhang Qianfeng, Shen Youlin. 1996. Carbon isotopic evidence for origin of the spherical graphite in a granite-hosted graphite deposit, Sujiquan, Xinjiang, China[J]. *Geochimica*, 25(4):379-386(in Chinese with English abstract).
- Zhang Sujiang, Cui Liwei, Zhang Yanwen, Han Jian, Shang Lei. 2018. Summarize on the graphite mineral resources and their distribution at home and abroad[J]. *China Mining Magazine*, 27(10):8-14(in Chinese with English abstract).

- Zhang Tianyu, Zhang Zhongliang, Li Jinqian. 2014. Summary of research status on regional metamorphic graphite deposit in China[J]. China Non-metallic Minerals Industry, 4:36-38(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yanfei, Liang Shuai, Zhao Qing, Liu Jingdang, Xiao Rongge. 2020a. Types of graphite deposits and metallogenic patterns of phanero-crystalline graphite deposits (I): Metallogenic geological background[J]. Geology of Chemical Minerals, 42(1):1-11, 18(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yanfei, Liang Shuai, Zhao Qing, Liu Jingdang, Xiao Rongge. 2020b. Types of graphite deposits and metallogenic patterns of phanero-crystalline graphite deposits (II): Ore minerals and mineralizing characteristics[J]. Geology of Chemical Minerals, 42(2):97-105, 124(in Chinese with English abstract).
- Zhou Qizhong, Yan Weidong, Yin Liwen, Xu Guifen, Wang Wenli, Jiang Weihua. 2019. Overview and demand analysis of global graphite resource[J]. Land and Resources Information, 6:28-32(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 安彤, 李建武. 2017. 全球石墨资源供需现状及趋势分析[J]. 中国矿业, 26(9):11-15, 20.
- 艾江, 吕新彪, 李作武, 吴亚伦. 2020. 黄羊山石墨矿床地质特征及成岩年代研究[J]. 中国地质, 47(2):334-347.
- 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, 12(91):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.
- 曹义甲, 祁东, 张冬霞, 柴丽洁, 焦杨. 2019. 坦桑尼亚莫罗戈罗地区班巴拉维石墨矿地球化学特征及成矿研究[J]. 矿产勘查, 10(2):333-343.
- 陈超, 李太升, 王茹. 2018. 莫桑比克太特省安格尼亚区石墨矿地质特征及找矿标志[J]. 资源环境与工程, 32(3):379-381, 429.
- 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.
- 高照国, 刘红召, 杨卉芄, 曹耀华, 张博, 王洪亮, 王威. 2018. 世界石墨资源分布概况及供求变化趋势[J]. 矿产综合利用, (3):26-29.
- 焦玄, 邱杨率, 张凌燕, 管俊芳, 欧阳志军. 2016. 莫桑比克 Nicanda Hill 地区石墨矿选矿试验研究[J]. 硅酸盐通报, 35(6):1940-1945, 1957.
- 黄国平, 胡清乐, 陈冬明, 李亮, 张众, 祝安安, 徐海波. 2014. 马达加斯加地质矿产概况[J]. 资源环境与工程, 28(5):626-632.
- 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.
- 李沅柏, 杨欣杰, 汪艳芸, 王磊, 李树才. 2021. 华北克拉通北缘乌兰地区石墨矿地质特征及成因分析[J]. 西北地质, 54(2):227-238.
- 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.
- 刘敬党, 肖荣阁, 张艳飞, 梁帅, 赵青, 白凤军, 张永兴, 王继春, 杨培奇, 刘剑. 2017. 华北显晶质石墨矿床[M]. 北京: 科学出版社, 300-328.
- 刘松柏, 梅梅珍, 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.
- 罗清威, 张克川, 秦德雨, 权成. 2018. 坦桑尼亚石墨矿地质特征及找矿前景[J]. 资源环境与工程, 32(1):51-54, 73.
- 马金虎, 刘阳, 马晓辉, 提云生, 马玉伟, 赵淦, 张向宁, 张健, 李艳翔, 赵亮. 2020. 马达加斯加石墨矿地质特征及其成因分析[J]. 地质与勘探, 56(4):878-888.
- 祁东, 张冬霞, 曹义甲, 柴丽洁, 陈璐璐, 黄达. 2020. 坦桑尼亚班巴拉维石墨矿与中国典型地区石墨矿对比研究[J]. 资源环境与工程, 34(1):36-40.
- 任军平, 胡鹏, 王杰, 王建雄, 张航, 刘江涛, 刘晓阳, 曾国平, 孙凯, 姜军胜, 古阿雷, 程湘, 陈军强, 赵凯, 吴兴源. 2021. 非洲矿业发展概况[J]. 地质学报, 95(4):945-961.
- 王登红. 2019. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向[J]. 地质学报, 93(6):1189-1209.
- 王奎良, 吴大天, 许逢明. 2020. 马达加斯加石墨矿床地质特征及资源潜力[J]. 地质与资源, 29(5):435-445, 410.
- 王力, 樊俊雷, 李雷, 康磊. 2017. 中国石墨资源概况及晶质石墨成矿规律[J]. 地质学刊, 41(2):310-317.
- 颜玲亚. 2014. 世界天然石墨资源、消费及国际贸易[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2:33-36.
- 颜玲亚, 高树学, 陈正国, 焦丽香, 孙莉, 刘艳飞, 周雯. 2018. 中国石墨成矿特征及成矿区带划分[J]. 中国地质, 45(3):421-440.
- 张国新, 胡霭琴, 张鸿斌, 张前锋, 中佑林. 1996. 新疆苏吉泉石墨矿床成因的碳同位素证据[J]. 地球科学, 25(4):379-386.
- 张苏江, 崔立伟, 张彦文, 韩健, 尚磊. 2018. 国内外石墨矿产资源及其分布概述[J]. 中国矿业, 7(10):8-14.
- 张天宇, 张忠良, 李金钱. 2014. 我国区域变质型石墨矿床研究现状综述[J]. 中国非金属矿工业导刊, 4:36-38.
- 张艳飞, 梁帅, 赵青, 刘敬党, 肖荣阁. 2020a. 石墨矿床类型及显晶质石墨矿床成矿模式(I):成矿地质背景[J]. 化工矿产地质, 42(1):1-11, 18.
- 张艳飞, 梁帅, 赵青, 刘敬党, 肖荣阁. 2020b. 石墨矿床类型及显晶质石墨矿床成矿模式(II):矿石矿物及矿化特征[J]. 化工矿产地质, 42(2):97-105, 124.
- 中华人民共和国自然资源部. 2020. 中国矿产资源报告 2020[M]. 北京: 地质出版社.
- 周起忠, 闫卫东, 尹丽文, 徐桂芬, 王文利, 江伟华. 2019. 世界石墨资源概况及需求分析[J]. 国土资源情报, 6:28-32.