

马达加斯加石墨矿床地质特征及资源潜力

王奎良, 吴大天, 许逢明

中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034

摘要: 马达加斯加石墨矿产主要产于太古宙—古元古代沉积变质地层中. 全岛划分 3 条石墨成矿带, 贯穿马达加斯加南北, 矿化带最大规模长达 200 km, 宽度 5000 m. 石墨矿体呈层状、似层状、条带状, 近南北向展布, 产状稳定. 矿体规模不等, 最大矿体长度 6100 m, 宽度 327 m, 深度延伸大于 1000 m. 固定碳品位 2.66%~9.02%. 马达加斯加石墨矿分布广泛, 石墨矿床规模多为大中型或超大型, 品位高, 粒度大. 石墨几乎全部为大片晶质石墨, 资源潜力广阔. 晶质石墨资源量大于 2×10^8 t.

关键词: 马达加斯加; 晶质石墨; 太古宙—古元古界; 成矿带; 区域沉积变质; 资源潜力

开放科学标志码(OSID):

DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2020.05.005



GEOLOGICAL CHARACTERISTICS AND RESOURCE POTENTIAL OF GRAPHITE DEPOSITS IN MADAGASCAR

WANG Kui-liang, WU Da-tian, XU Feng-ming

Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China

Abstract: The graphite minerals of Madagascar are mainly produced in the Archean-Paleoproterozoic sedimentary metamorphic strata. The whole island is divided into 3 graphite metallogenic belts, stretching from north to south, with the largest mineralized zone of 200 km long and 5000 m wide. The graphite orebodies appear in stratified, stratoid and banded shapes, spreading nearly in N-S with stable occurrence. The orebodies vary in size, with a maximum length of 6100 m, width of 327 m, and depth extension more than 1000 m. The grade of fixed carbon is 2.66%–9.02%. The graphite deposits in Madagascar are widely distributed, mostly super-large or medium-large scaled, with high grade and large grain size. Almost all of them are large crystalline graphites, which has vast resource potential. The resource amount of crystalline graphites is more than 200 Mt.

Key words: Madagascar; crystalline graphite; Archean-Paleoproterozoic; metallogenic belt; regional sedimentary metamorphism; resource potential

0 引言

马达加斯加石墨矿资源居非洲首位, 为该国主要开发矿种, 是世界优质石墨重要产地之一. 截至 2018

年末, 马达加斯加探明石墨储量达 3000×10^4 t, 石墨资源量估计在 2×10^8 t 以上. 近年来, 中国学者陆续对马达加斯加油气、金、钛、铬、石墨等优势矿产资源做出了

收稿日期: 2020-02-23; 修回日期: 2020-05-28. 编辑: 张哲、黄欣.

基金项目: 中国地质调查局项目“俄罗斯远东及马达加斯加矿产资源潜力评价”(编号 DD20160104B)、“塞尔维亚铜金资源调查”(编号 DD20201162).

作者简介: 王奎良(1963—), 男, 高级工程师, 主要从事地质矿产勘查工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//470186084@qq.com

com

不少探索和研究^[1-6].

1 马达加斯加区域地质概况

马达加斯加岛的 2/3 面积为前寒武纪变质岩系, 变质程度大多为角闪岩相—麻粒岩相, 少量绿片岩相. 1/3 面积为显生宙, 未受到强烈构造热事件影响, 整体保留了与泛非造山运动有关的大量的构造痕迹, 成为研究冈瓦纳大陆形成、演化的重要地区^[7-9]. 马达加斯加前寒武纪岩石主要经历 3 次大的构造岩浆热事件, 分别为 3300~1800 Ma、1100 Ma、700 Ma 和 650~500 Ma, 分别对应于新太古代—古元古代陆核形成、中新元古代罗迪尼亚大陆形成与裂解和新元古代冈瓦纳大陆聚合与东非造山带形成. 前人将马达加斯加从南西到北东前寒武系结晶基底划分为 6 个构造单元或地块, 其中包括 Vohibory、Androyen-Anosyen、Ikalamavony、Antananarivo、Antongil-Masora 和 Bemarivo 单元^{①②}(见图 1).

马达加斯加石墨矿分布整体受各构造单元相互作用影响及韧性剪切带控制. 主要含矿单元为 Antananarivo 单元及其与其他地质单元相接触的边缘处, 尤其是与 Itremo 岩席及 Tsaratanana 岩席接触的边缘缝合带、Betsimisaraka 缝合带, Anosyen-Androyen 构造带及其与 Vohibory 构造带之间的 Ampanihy 剪切带的石墨矿产地广泛分布^[10-15]. 在 Sahantaha 群和北 Antsirabe 岩套及太古宙混合片麻岩中也有少量分布. 多出现在韧性剪切带附近, 延至地幔的韧性剪切带可能为深部流体提供了运移通道及容矿空间^{③④}.

1.1 区域地层

整个马达加斯加岛前寒武系按照岩性及变质程度可分为太古宙深变质岩系, 太古宙—新元古代混合岩系及中新元古代浅变质岩系. 显生宙地层分布于马达加斯加岛的周边, 主要有石炭系、侏罗系、白垩系等^[16-18](见图 2).

马达加斯加石墨矿床全部赋存于前寒武系地层中. 前寒武纪变质基底分为南北两部分, 南部占全岛前寒武纪基底面积的 1/5, 主要为元古宙变质岩组成, 中北部主要由太古宙—元古宙麻粒岩相—高角闪岩相

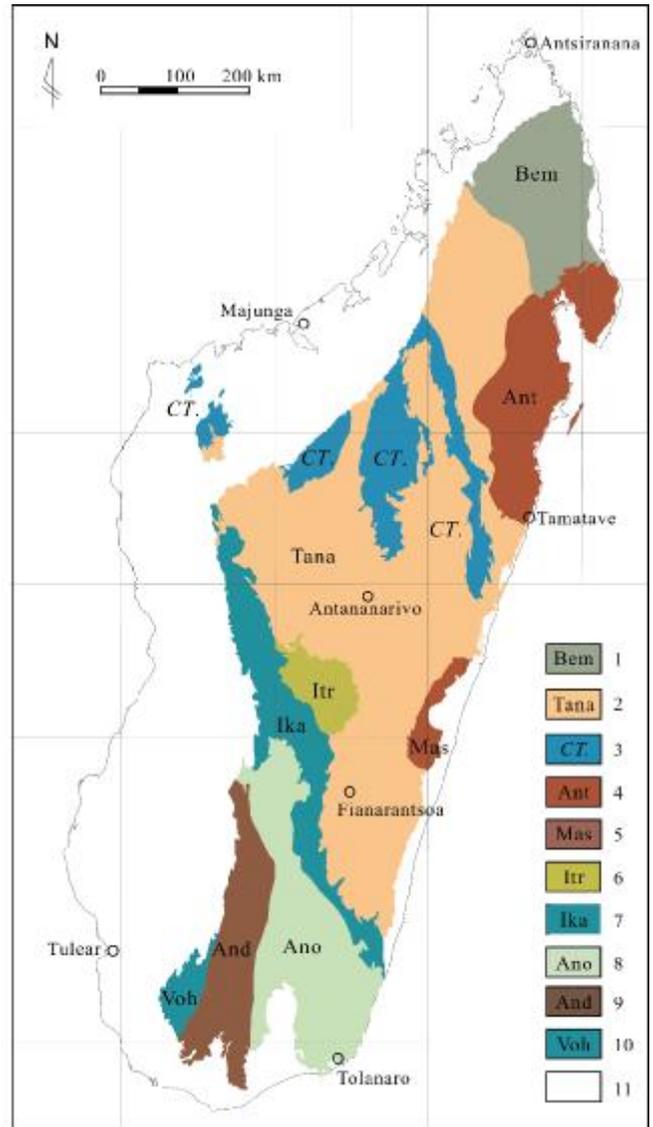


图 1 马达加斯加构造单元划分

Fig. 1 Tectonic unit division of Madagascar

1—Bemarivo 单元 (Bemarivo unit); 2—Antananarivo 单元 (Antananarivo unit); 3—Tsaratanana 岩席 (Tsaratanana sheet); 4—Antongil 单元 (Antongil unit); 5—Masora 单元 (Masora unit); 6—Itremo 岩席 (Itremo sheet); 7—Ikalamavony 单元 (Ikalamavony unit); 8—Anosyen 单元 (Anosyen unit); 9—Androyen 单元 (Androyen unit); 10—Vohibory 单元 (Vohibory unit); 11—显生宙沉积盖层 (Phanerozoic sedimentary cover)

正片麻岩组成^①.

南部元古宙变质岩系自东向西包括 Androyen、Graphite 和 Vohibory 系 3 套地层, 其中 Androyen 系主

①狄永军, 等. 中国地质大学(北京)马达加斯加石墨矿产调查与评价课题成果报告. 2018.

②Tucker R D, et al. Cartes Géologique et Métallogéniques de la République de Madagascar à 1/1 000 000. 2012.

③刘田, 等. 马达加斯加图利亚省安巴希塔石墨矿(7-13 线)详查地质报告. 2018.

④陈波, 等. 马达加斯加图阿马西纳石山石墨矿详查实施方案. 2012.

麻岩、石墨混合片麻岩、含石墨长英麻粒岩(mica schist, mica-graphite gneiss, graphite amphogneiss, graphite-bearing leptite); 29—钙质副片麻岩—混合岩、方解石岩、辉石岩、云母大理岩、长英麻粒岩、紫苏花岗岩、含堇青石长英质麻粒岩(calcareous paragenesis-migmatite, calcitite, pyroxenite, cipolino, leptite, enderbite, cordierite-bearing felsic granulite); C1—Vohibory 组角闪质片麻岩、角闪岩云母大理岩(amphibolic gneiss and amphibolite cipolino of Vohibory fm.); C2—Malakialina 组云母片岩、硅质岩(石英岩)(mica schist and siliceous rock/ quartzite of Malakialina fm.); C3—Amborompotsy 组片麻岩、角闪石岩、云母大理岩(gneiss, hornblendite and cipolino of Amborompotsy fm.); C4—Migmatites 组云母片岩、片麻岩、片岩、混合岩(mica schist, gneiss, schist and migmatite of Migmatites fm.); C5—Beforona 组角闪质混合岩、角闪岩 (amphibolic migmatite and amphibolite of Beforona fm.); C6—Maevatanana 组角闪岩、片岩、石英混合岩、片麻岩(amphibolite, schist, quartz migmatite and gneiss of Maevatanana fm.); C7—Ambodiriana 组云母片岩、长石质岩石(mica schist and feldspathic rock of Ambodiriana fm.); C8—Antogil 组绿帘石混合岩(epidote migmatite of Antogil fm.); C9—片麻岩、石英岩、云母大理岩(gneiss, quartzite, cipolino); C10—绿帘石化角闪岩、绿帘石岩、片麻岩、花岗闪长岩(epidotized hornblende, epidosite, gneiss, granodiorite)

要由夕线石—堇青石—石榴石副片麻岩、花岗片麻岩、混合岩、紫苏花岗岩、石英岩和少量大理岩组成,典型特征是发育大量的金云母矿化。Graphite 系以含有大量石墨片岩(部分石墨碳含量 60%~70%)、石英岩、变粒岩(一般为含石榴石浅色正片麻岩,石英形成矿物线理)和少量大理岩为特征,在其内发育 660±60 Ma 斜长岩岩体。Vohibory 系包括花岗片麻岩、厚层大理岩、角闪岩—辉岩、石英岩、副片麻岩和少量豆荚状、透镜状蛇纹石岩。含有铬铁矿层的蛇纹石化斜方辉橄岩和二辉橄榄岩可能为蛇绿岩残留体,伴生有枕状斜长角闪岩、变辉长岩、变橄长岩等变质岩体^①。

中北部中新太古代到古元古代地层自东向西包括 Antongil 块体、Antananarivo 块体、Tsaratana 岩席和 Bemarivo 带 4 个构造单元,其中 Antongil 块体同印度南部达瓦尔绿岩带具有亲缘关系,由 3.2 Ga 的花岗质混合岩、角闪片麻岩等正片麻岩和 2.5 Ga 的花岗岩侵入体组成,边部为变质沉积岩—副片麻岩(包括云母片岩、斜长角闪岩、绿帘石混合岩和少量石英岩),变质程度为绿片岩相—角闪岩相,构造线方向近南北向。Antananarivo 块体包含了中部的变质沉积岩组成的 Itremo 块体——著名的 SQC 岩群,主要由 2500~600 Ma 石墨片麻岩、石墨混合岩、云母片岩、混合岩、紫苏花岗岩、含石墨混合片麻岩、黑云角闪片麻岩、绿帘石辉石片麻岩组成。Itremo 块体由石英岩、变质泥岩、白云岩化大理岩、斜长角闪岩和混合片麻岩组成。Tsaratana 岩席由 3 条新太古代绿岩带组成,岩石类型包括混合岩、斜长角闪岩、角闪片麻岩、黑云片麻岩、磁铁矿石英岩、英云闪长质片麻岩、紫苏花岗岩以及皂石岩和滑石片岩等,测定的变质岩原岩侵位时间介于 2.7~2.4 Ga,

上覆于 Antananarivo 块体上,二者间存在大型逆冲推覆构造。Bemarivo 带位于马岛最北部,由具有典型活动大陆边缘岩浆弧特征的元古宙岩石组成,是新元古代安第斯型岛弧分解后的残片。

1.2 区域变质作用和岩浆活动

伴随着冈瓦纳古陆克拉通形成及增生、裂解、拼合,马达加斯加自太古宙以来岩浆作用强烈且时空分布广泛,形成了多阶段的超基性—酸性火山侵入岩浆,特别是前寒武纪侵入岩浆作用与成矿作用紧密相关。由于前寒武纪沉积及岩浆建造大多经过了多阶段变质变形作用的强烈改造,区域岩浆岩已经发生不同程度的变质,多以变质杂岩体的形式产出。

1.3 区域构造演化与矿产

前人将马达加斯加从西南到东北前寒武系结晶基底划分为 6 个构造单元,其中包括 Vohibory、Androyen-Anosyen、Ikalamavony、Antananarivo、Antongil-Masora 和 Bemarivo 单元,定义了前寒武纪地盾构造单元^②。

马达加斯加太古宙地盾由 Antongil-Masora 和 Antananarivo 地块组成。东部的 Antongil-Masora 单元由古—中太古代的 TTG 片麻岩(3.3~3.2 Ga)和广泛出露的副片麻岩(BIF 和超铁镁质片麻岩)组成,其年龄介于 3.2~2.5 Ga 之间。一般而言,Antongil-Masora 和 Antananarivo 单元代表着印度和马达加斯加大达尔瓦克拉通扩张—合并(2.5~2.45 Ga)的延续。北部的 Bemarivo 单元是变质岩浆岩,具有古元古代隐伏基底。单元内叠加着数十种花岗岩或岩浆岩,它们是高应变岩石,记录了冈瓦纳古陆在新元古代的收敛和合并。在马达加斯加南部,Androyen-Anosyen 单元下部是古元古代(2.0~1.8 Ga)的大陆地层,在 Stratherian 时代(约 1.8~

① 刘田,等. 马达加斯加图利亚省安巴希塔石墨矿(7-13 线)详查地质报告. 2018.

② 陈波,等. 马达加斯加图阿西纳山石墨矿详查实施方案. 2012.

③ Tucker R D, et al. Cartes Géologique et Métallogéniques de la République de Madagascar à 1/1 000 000. 2012.

75 Ma) 被增生到 Antananarivo 单元. Antananarivo 和 Androyen-Anosyen 单元被解释为火山沉积的侵入岩浆岩, 它主要在 Stenian-Tonian 时代 (1.04~0.95 Ga) Androyen-Anosyen 和 Antananarivo 单元的地壳上形成. Vohibory 单元是新元古代早期的一个海相地层, 在低温时期 (约 0.64 Ga) 被增生到 Androyen-Anosyen 域 (0.62 Ga).

这种复杂的地质环境以整个前寒武纪时期的陆相沉积、变形和岩浆作用相继出现为特征, 是各种资源及石墨矿产形成的原因. 区内矿产资源丰富, 现已发现矿种十几种. 其中金属矿种有金、铜、镍、钴、铁、锰、铀、铅、锡和铂族元素等; 主要非金属矿有石墨、宝石、高岭土等^[13].

2 马达加斯加石墨资源分布规律

2.1 分布特征

全国从北东到南西划分为 3 条石墨成矿带(图3)^①, 分别为 Bekily-Ampanihy 石墨成矿带、Ambatolampy-Fianarantsoa 石墨成矿带和 Befandriana-Toamasina 石墨成矿带. 成矿带近南北或北北东向展布, 贯穿马达加斯加全岛南北.

Bekily-Ampanihy 石墨成矿带主要分布于 Anosyen-Androyen 构造单元的 Ampanihy 和 Beraketa 高应力区域以及形状不规则的区域内^[14-18]. 南北长度 290 km, 宽度 114 km, 包括 Ambahita 矿床.

Ambatolampy-Fianarantsoa 石墨成矿带主要分布在 Antananarivo 构造单元西侧, Manampotsy 富含石墨的剪切带中. 南北长度 756 km, 宽 136 km, 包括 Ambohimandroso、Andasibe-Perinet、Antsirakambo 和 Marovintsy 矿床, 也是马达加斯加主要石墨矿床集中地区.

Befandriana-Toamasina 石墨成矿带主要分布在 Antananarivo 构造单元东侧的 Angove 剪切带和 Betsimisaraka 缝合带中. 南北长度 702 km, 宽 117 km, 包括 Toamasina 石山矿床、Vohitasara 矿床. Befandriana-Toamasina 石墨成矿带向南延伸与 Ambatolampy-Fianarantsoa 石墨成矿带合并.

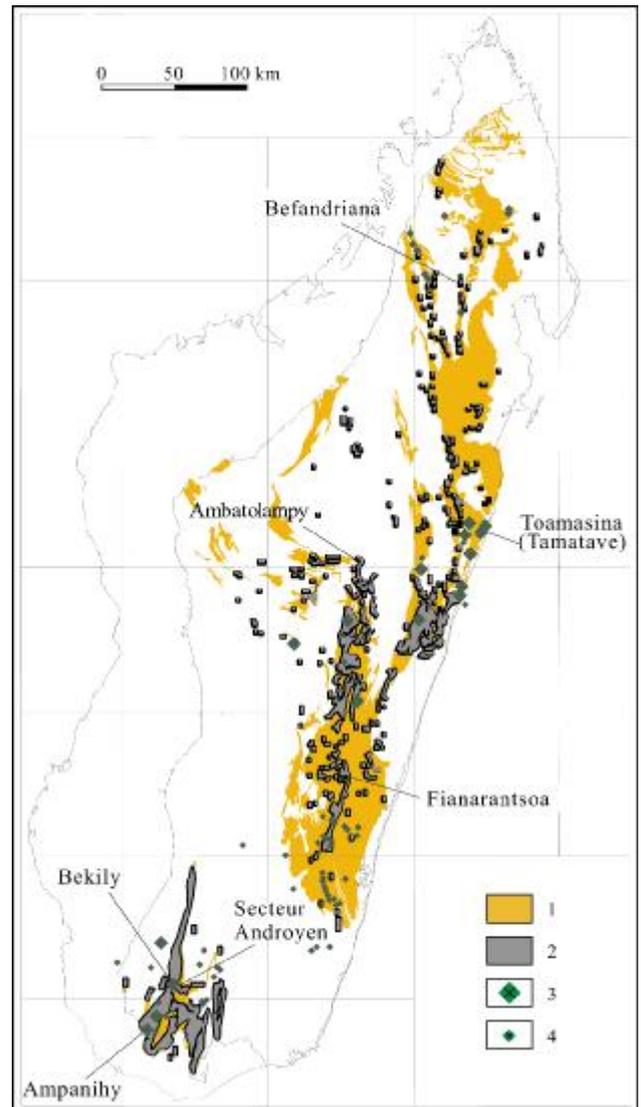


图3 马达加斯加石墨及潜力资源分布略图

Fig. 3 Distribution of graphite and potential resources in Madagascar

1—石墨矿产预测区 (prediction area of graphite mineral); 2—石墨成矿带 (graphite metallogenic belt); 3—石墨矿床 (graphite deposit); 4—石墨矿(化)点 (graphite mineralization/occurrence)

现已发现的大型或超大型石墨矿床主要分布于南部和东部成矿带上, 已发现矿产地 17 余处, 矿点 37 处.

2.2 主要类型

马达加斯加石墨的母源来自富含碳的沉积岩及富含二氧化碳的变质流体, 即散落的碳质沉积的碳酸盐^{②③}

① Tucker R D, et al. Cartes Géologique et Métallogéniques de la République de Madagascar à 1/1 000 000. 2012.

② Sutphin D M. Descriptive model of disseminated flake graphite//Orris G J, et al. Eds. Some Industrial Mineral Deposit Models. Descriptive Deposit Models: U.S. Geological Survey, 1991.

③ Sutphin D M. Descriptive model of graphite veins//Orris G J, et al. eds. Some Industrial Mineral Deposit Models. Descriptive Deposit Models: U.S. Geological Survey, 1991.

或黏土页岩^[19-20]两种母岩和变质地层中的石墨细脉。这些石墨细脉可能是由碳沉淀形成的,在矿物(石英、石榴石等)流体包裹体中观察到有石墨存在^[21-22]。

在石墨矿区所采集样品中石墨与全岩 $\delta^{13}\text{C}$ 数据截然不同,指示岩石中的C具有两种截然不同的碳源。其中石墨矿石石墨 $\delta^{13}\text{C}$ 集中分布在 -20.1‰ ~ -23.7‰ ,而石墨矿石无机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 变化于 -1‰ ~ -4‰ 之间。前者与有机物碳源的平均值(-25‰)接近,后者与海相碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 接近,表明变质过程中发生了碳同位素的交换^①。

综上所述,马达加斯加石墨矿床为沉积变质型石墨矿床和变质流体型石墨矿床两种矿床类型。

2.2.1 沉积变质型石墨矿床

沉积变质型石墨矿床主要赋存在高铝、富碳陆源碎屑沉积变质岩中。含矿岩系为一套富铝夕线石片岩、石英片岩、长英质片麻岩,富碳石墨片岩及大理岩、钙硅酸盐岩等。

根据石墨矿体赋存产状、围岩特征及已知年龄数据,认为马达加斯加石墨矿床成矿年龄跨度大、周期长。从新太古代石墨矿产初步形成,至新元古代继承和发展,经过了漫长的区域变质+混合岩化复杂的地质成矿作用过程。

沉积变质型石墨矿床可分为3个成矿阶段:1)沉积阶段,在较稳定的浅海环境中沉积了一套富含有机质的泥(页)岩、粉砂质泥岩、泥灰岩;2)区域变质阶段,上述沉积岩在高级变质过程中有机碳发生重结晶作用形成石墨;3)混合岩化阶段,部分矿体在混合岩化过程中发生石墨重结晶作用,使石墨片度、粒度加大,形成晶质石墨。

马达加斯加沉积变质型石墨矿床表现为储量大、分布广。石墨矿体呈层状、似层状、条带状,产状稳定,近南北向展布。矿石组构为鳞片粒状变晶结构,片(麻)状—弱片麻状构造。

Ambohimandroso 石墨矿床的测年结果^②,3件样品获得33个有效数据测点,大部分在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ — $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上表现为较好的谐和性,测试结果显示锆石年龄具有218~2475 Ma ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄)的年龄谱,主要分布在218~578 Ma、919~1136 Ma、1698~2475 Ma

三个区间内。其中1698~2475 Ma区间的年龄可能指示石墨片岩原岩源区的年龄。919~1136 Ma区间的年龄可能指示了矿区在这个时间经历了一次热事件。

2.2.2 变质流体型石墨矿床

该类型矿床表现为呈脉状顺层或斜切于沉积变质岩中,以Vohitasara石墨矿区和Antanisoa石墨矿区为例,均存在脉状石墨矿,至少说明存在碳的活化、迁移和再沉淀。

Vohitasara 石墨矿床可观察到已风化成土状的细脉状石墨矿化,镜铁矿和褐铁矿化,石墨鳞片较大,直径为2~4 mm,围岩片麻理产状为 $282^\circ \angle 51^\circ$ 。另可见长英质岩脉,粒状石墨以浸染状分布在长英质岩脉内,石墨片粒度加大。在矿区北西方向也发现石墨以浸染状分布在长英质、花岗质岩石中,或是在硅质脉体周边异常富集。

Vohitasara 矿区石英脉中测得 448 ± 4 Ma、 490 ± 6 Ma、 686 ± 7 Ma三组年龄的锆石在极发光图像(CL)中显示变质锆石的特征,Hulscher和Fitzsimons认为550~530 Ma之间仍然在汇聚(俯冲)^[23],那么490~448 Ma才可能代表了该区峰期变质年龄。前述该区石墨矿床的矿物组合反映了未受到峰期变质的影响,暗示该区石墨矿床的形成时代在490~448 Ma之后。

Antanisoa 石墨矿床除石墨通常以薄片状赋存于富含碳的变质岩中,但也可见以石墨脉在伟晶岩中产出。石墨矿床中的石墨呈脉状赋存于裂隙中,具粗晶结构,脉体宽度大部分大于4 cm,表现为纤维状或针状结晶的块状、板状交生集合体。这是最纯的石墨形式,显示出浅的金属光泽和针状形态。

2.3 典型矿床特征

2.3.1 Ambahita 石墨矿床^①

矿床位于Androyen-Anosyen构造单元Bekily-Ampanihy石墨成矿带中。矿体赋存于新太古界Graphite岩系(Ar_3G)石墨变粒岩中(见图4)^②。岩层片麻理呈北北东向展布,倾向北西,倾角 40° ~ 75° ,产状变化较大。片麻理与区域构造线一致。石墨变粒岩层为矿床的主要赋矿地层。

①狄永军,等.中国地质大学(北京)马达加斯加石墨矿产调查与评价课题成果报告.2018.

②刘田,等.海马达加斯加国图利亚省安巴希塔石墨矿(7-13线)详查地质报告.2018.

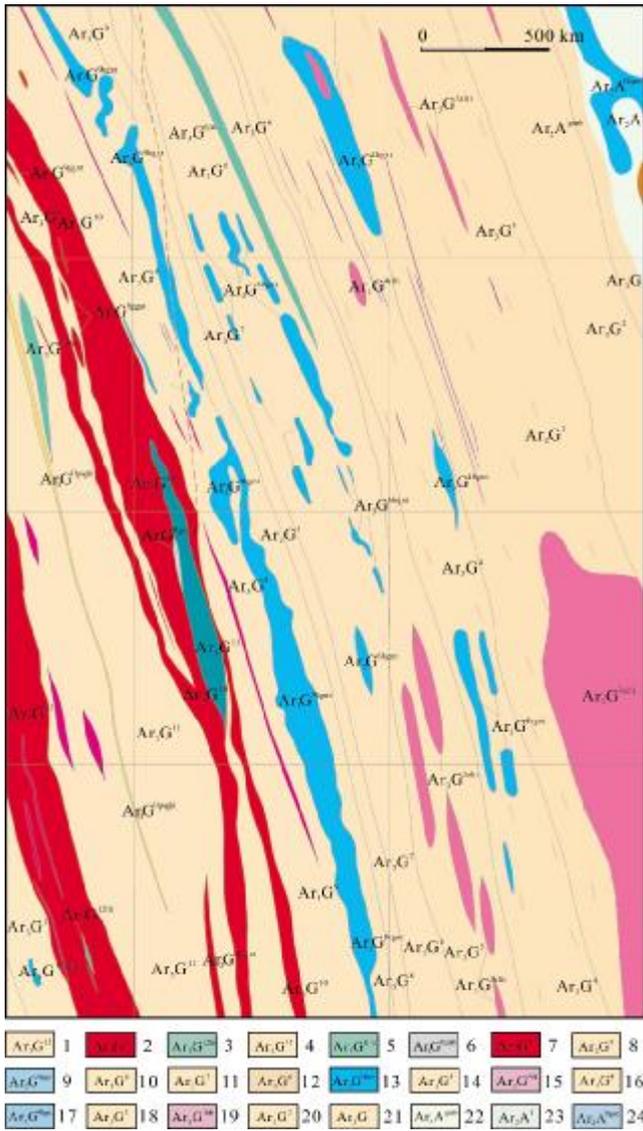


图 4 Ambahita 矿区地质略图

Fig. 4 Geological sketch map of Ambahita orefield

1—灰白色石榴石浅粒岩(矿体顶板)(offwhite garnet leptyte/ orebody roof); 2—灰-浅灰色石墨变粒岩(矿体)夹灰白色含石墨浅粒岩构造条带或透镜体 (grey-light grey graphite granulite/orebody with offwhite graphite-bearing leptyte structural belt or lenticle); 3—灰白色混合岩化浅粒岩构造条带或透镜体 (offwhite migmatized leptyte structural belt or lenticle); 4—灰白色石榴石浅粒岩夹浅粒岩、含石墨石榴石浅粒岩构造透镜体(offwhite garnet leptyte with leptyte, graphite-bearing garnet leptyte structural lenticle); 5—灰白色浅粒岩构造透镜体 (offwhite leptyte structural lenticle); 6—灰白色含石墨石榴石浅粒岩构造透镜体 (offwhite graphite-bearing garnet leptyte structural lenticle); 7—深灰色石墨变粒岩(矿体)(dark grey graphite granulite/orebody); 8—灰白色石榴石浅粒岩(矿体底板)(offwhite garnet leptyte/ orebody bottom); 9—深灰-绿灰色角闪变粒岩构造透镜体(古侵入体)(dark grey-greenish gray

hornblende granulite structural lenticle/paleo-intrusion); 10—灰白色-浅灰色含石墨浅粒岩局部夹片理化浅粒岩及(含)石榴石浅粒岩(offwhite-light grey graphite-bearing leptyte partially with foliated leptyte and garnet leptyte); 11—灰白色混合岩化浅粒岩局部夹混合岩化含石墨浅粒岩及石榴石浅粒岩 (offwhite migmatized leptyte partially with migmatized graphite-bearing leptyte and garnet leptyte); 12—灰白色石榴石浅粒岩夹灰白色浅粒岩、含石墨浅粒岩及片理化石榴石浅粒岩 (offwhite garnet leptyte with white leptyte, graphite-bearing leptyte and foliated garnet leptyte); 13—深灰-绿灰色角闪变粒岩构造透镜体 (dark grey-greenish hornblende granulite structural lenticle); 14—灰色-浅灰色含石墨浅粒岩夹或间互浅粒岩及石墨变粒岩(grey-light grey graphite-bearing leptyte with leptyte and graphite granulite); 15—灰白色石榴石浅变粒岩构造透镜体(offwhite garnet leptyte structural lenticle); 16—灰白色强片理化浅粒岩(offwhite strongly-foliated leptyte); 17—深灰-绿灰色角闪变粒岩构造透镜体 (dark grey-greenish hornblende granulite structural lenticle); 18—灰白色强片理化浅粒岩 (offwhite strongly-foliated leptyte); 19—灰白色片理化石榴石浅粒岩构造透镜体 (offwhite foliated garnet leptyte structural lenticle); 20—深灰-绿灰色角闪变粒岩 (dark grey-greenish gray hornblende granulite); 21—灰白色混合岩化浅粒岩(offwhite migmatized leptyte); 22—白色中粗粒大理岩、(含)石榴石大理岩及(含)黑云母大理岩 (white medium-coarse grained marble, garnet marble, biotite marble); 23—灰白色混合岩化浅粒岩 (offwhite migmatized leptyte); 24—深灰色-绿灰色角闪变粒岩构造透镜体(dark grey-greenish gray hornblende granulite structural lenticle) Ambahita 石墨矿化带宽度大于 5000 m,长度大于 200 km. 圈定矿体 12 处,最大 II 号矿体长 6100 m,倾向延伸 1000 m,厚度 120~327 m(图 5),固定碳 3%~40%. 石墨矿体受沉积变质作用控制,呈层状、似层状、条带状、透镜状产出,成群成带分布,单一矿体长度不等,一般为 200~400 m,最长可达 10 km 以上,厚度几米至上千米,总体沿北北东向展布,倾向以西向为主,倾角 42~70°,石墨平均品位 6.5%~16.6%.

Ambahita 石墨矿化带宽度大于5000 m,长度大于 200 km. 圈定矿体 12 处,最大 II 号矿体长 6100 m,倾向延伸 1000 m,厚度 120~327 m (图 5),固定碳 3%~40%. 石墨矿体受沉积变质作用控制,呈层状、似层状、条带状、透镜状产出,成群成带分布,单一矿体长度不等,一般为 200~400 m,最长可达 10 km 以上,厚度几米至上千米,总体沿北北东向展布,倾向以西向为主,倾角 42~70°,石墨平均品位 6.5%~16.6%.

通过对 I 号和 II 号矿体资源量估算,求得石墨矿石控制的和推断的内蕴经济资源量(332+333):石墨矿石量(风化+原生)57265×10⁴ t,矿物量 2904×10⁴ t,矿床平均品位 4.57%. 规模达特大型石墨矿床. 晶质石墨远景资源量估计在 5000×10⁴ t 以上^①.

①刘田,等. 海马达加斯加国图利亚省安巴希塔石墨矿(7-13 线)详查地质报告. 2018.

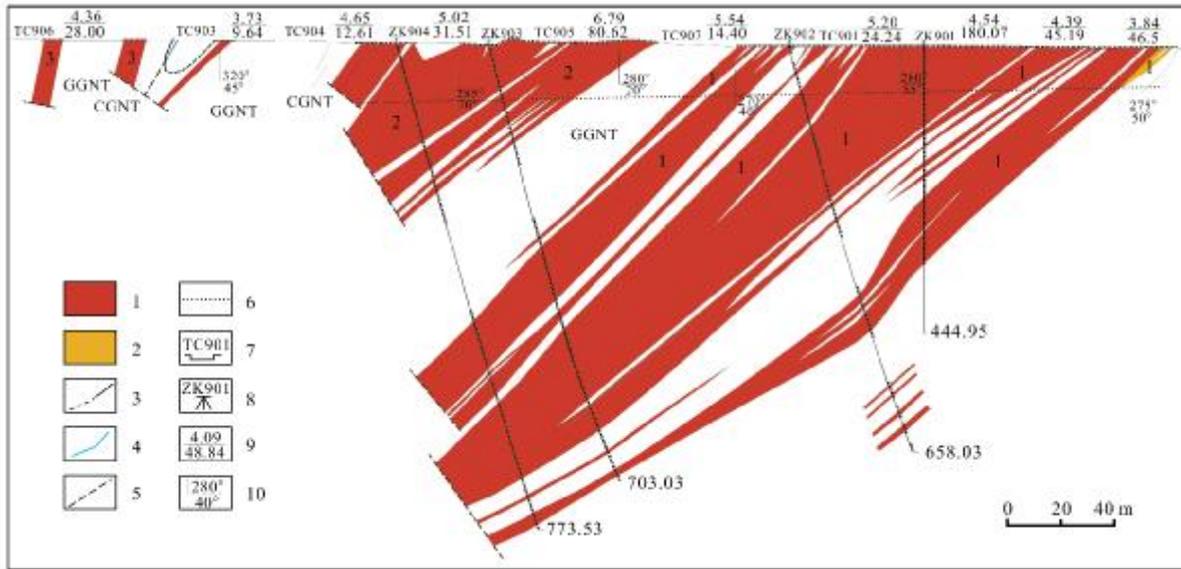


图5 Ambahita 石墨矿床剖面图

Fig. 5 Profile of Ambahita graphite deposit

1—石墨矿体及其编号(graphite orebody and number); 2—低品位石墨矿体及其编号(low-grade graphite orebody and number); 3—实测(推测)地质界线(surveyed/inferred geological boundary); 4—矿体中心线(center line of orebody); 5—资源量估计边界线(resource estimation boundary); 6—风化矿与原生矿边界线(boundary between weathered and primary ore); 7—探槽及编号(exploratory trench and number); 8—钻孔及编号(borehole and number); 9—样段平均品位/样段厚度(average grade/thickness of sampling section); 10—产状(occurrence)

矿石构造以块状、片状和片麻状构造为主,其次为细脉状和浸染状或星散状分布. 矿石结构呈鳞片粒状变晶结构.

矿石矿物为石墨,灰褐色,多呈自形一半自形叶片状、长片状,片径多为 0.04~2.0 mm,大者可达 5 mm,多呈集合体. 脉石矿物主要有石英、长石、黑云母、金云母、绿帘石、电气石和黏土矿物及少量金属矿物等.

化学成分:SiO₂ 含量为 54.93%~62.58%, 平均为 58.27%,变化范围不大,且含量相对较高;Al₂O₃ 11.35%~17.05%, 平均达到 13.64%;TF_eO₃ 9.0%~10.27%, 平均 9.79%;MgO 0.56%~1.52%, 平均 1.15%;CaO 0.15%~2.97%, 平均 1.59%;TiO₂ 0.56%~1.10%, 平均 0.73%. SiO₂、TF_eO₃ 的含量偏高,CaO、Na₂O、K₂O 含量低,Al₂O₃ 含量和 MgO 含量适中,表现出富硅铁副变质岩的特征.

Ambahita 石墨矿床成因类型为沉积变质型矿床和变质流体型石墨矿床. 沉积变质型石墨矿床赋存于新太古界 Graphite 岩系 Ampanihy 群地层中,原岩为富含有机质的砂泥岩,在区域变质过程中逐渐形成石墨变粒岩、弱片麻状石墨变粒岩、片麻状石墨变粒岩、条

带状-不规则团块状混合岩化石石墨片麻岩. 变质流体型石墨矿床与新元古代或更晚些的混合岩化作用有关,形成含石墨长英质脉状矿体.

2.3.2 Antanisoa 石墨矿床

矿床赋存于 Antananarivo 构造单元 Ambatolampy-Fianarantsoa 石墨成矿带古元古界沉积变质单元 Ambatolampy 群中. 该群总体上以云母片岩为主,以东为片麻岩和向混合岩演化. 地层产状均为北东走向,倾向北西,倾角 22~40°. 片岩中普遍含有黑云母、夕线石、石榴石、电气石、石墨及少量副矿物^①.

石墨矿床划分为 3 段(图 6)^①:南段见 4 条石墨矿带,总体走向为 40~70°,倾向北西,倾角 20~40°. 主矿层长度约 940 m,矿带厚度 1~11 m. 石墨平均品位 6.5%~16.6%. 中段见 2 条石墨矿带,总体长度约 250 m,走向 40~70°,倾向北西,倾角 25~45°. 矿带厚 5~10 m. 石墨平均品位 14.5%~15.8%. 北段石墨矿层总体长度约 1000 m,走向为 50~60°,倾向北西,倾角 20~32°,矿层厚 1~4 m,石墨平均品位 8.0%.

矿石构造以块状构造和条带构造为主,其次为细脉状和浸染状构造. 矿石结构分为鳞片变晶结构、细

① 狄永军,等. 中国地质大学(北京)马达加斯加石墨矿产调查与评价课题成果报告. 2018.

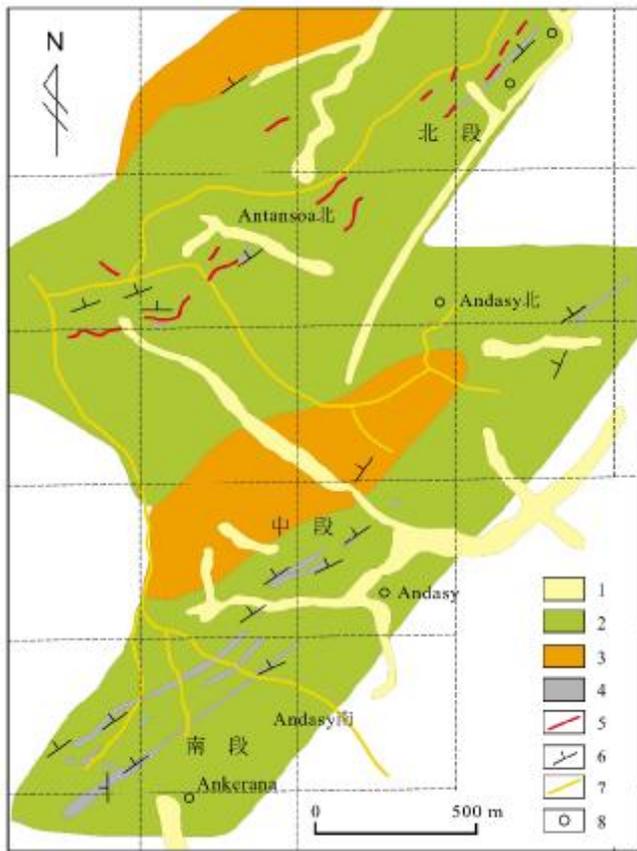


图 6 Antanisoa 石墨矿区矿体平面示意图

Fig. 6 Schematic map of the orebodies in Antanisoa graphite orefield

1—第四系沉积物 (Quaternary sediment); 2—云母片岩 (mica schist); 3—混合岩 (migmatite); 4—石墨矿体 (graphite orebody); 5—石英脉 (quartz vein); 6—产状(occurrence); 7—道路(road); 8—村庄(village)

鳞片变晶结构和包裹结构. 矿石矿物为石墨, 脉石矿物主要有石英、金云母、电气石、赤铁矿-褐铁矿和黏土矿物.

化学成分: SiO₂ 含量为 21.95%~49.05%, 平均 37.34%, 变化范围较大, 且含量相对较低; Al₂O₃ 12.89%~33.41%, 平均达到 19.92%; TiO₂ 0.54%~0.67%, 平均 0.58%; CaO 0.08%~1.35%, 平均 0.45%; MgO 0.1%~5.39%, 平均 2.19%; TFe₂O₃ 2.5%~7.8%, 平均 4.45%. Al₂O₃ 的含量高, CaO、Na₂O、K₂O 含量低, TFe₂O₃ 和 MgO 含量适中, 表现出富铝副变质岩的特征.

Antanisoa 石墨矿床赋存于古元古界 Graphite 岩系沉积变质单元 Ambatolampy 群地层中, 被认为是源自碳质泥质沉积物经过区域变质及混合岩化而成的沉积变质型石墨矿床. 此外, 可见石墨脉在伟晶

岩中产出, 石墨呈脉状赋存于裂隙脉中, 可能为热液成因.

2.3.3 Toamasina 石山石墨矿床

矿床位于 Antananarivo 构造单元 Befandriana-Toamasina 石墨成矿带中, 矿体赋存于沉积变质单元 Manampotsy 群的含石墨片岩和含石墨片麻岩中(图 7). 含石墨斜长片麻岩为鳞片粒状变晶结构, 片麻状构造. 岩层的大致产状为走向 10~80°, 倾角 35~60°. 从区域地质资料来看, 该岩层厚度大于 360 m.

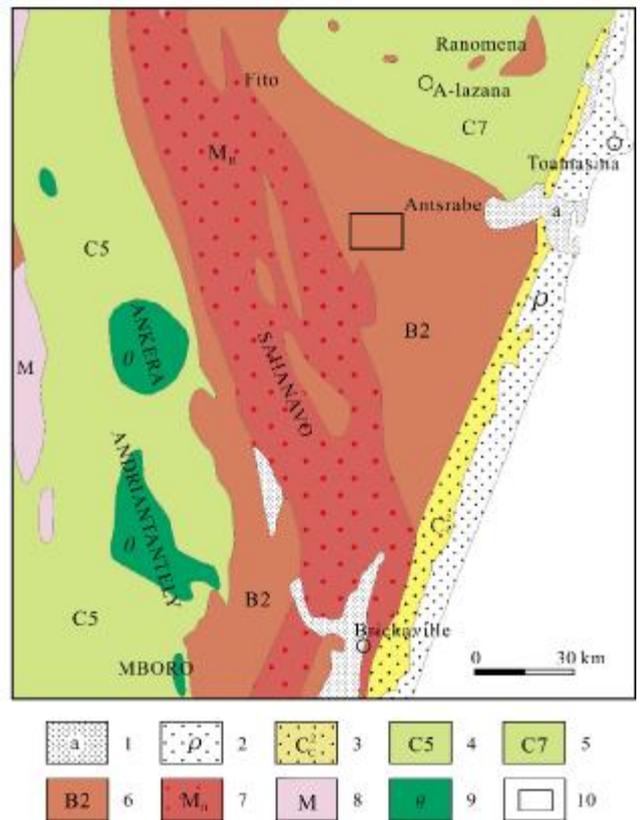


图 7 Toamasina 石山石墨矿床区域地质图

Fig. 7 Regional geological map of Toamasina graphite deposit

1—沙滩冲积地 (beach alluvium); 2—含盐盆地 (salt basin); 3—白垩系上段 (upper Cretaceous); 4—Beforona 群角闪质混合岩、角闪岩 (amphibolic migmatite and amphibolite of Beforona gr.); 5—Ambodiriana 群云母片岩、长石质岩石 (mica schist and feldspathic rock of Ambodiriana gr.); 6—Manampotsy 群石墨片麻岩、含石墨混合岩 (graphite gneiss and graphite-bearing migmatite of Manampotsy gr.); 7—混合花岗岩 (migmatitic granite); 8—混合岩 (migmatite); 9—辉长岩 (gabbro); 10—石墨矿区 (graphite orefield)

根据现场调查, 地表出露的均为风化石石墨矿体. 石墨矿体受沉积变质作用控制, 有一定的层位, 产状多与围岩产状一致, 呈层状、似层状或透镜状, 长度一般

为 200~400 m, 倾角 42~70°, 矿体由密集的多层石墨矿层组成, 总含矿层厚度大于 15 m, 单矿层厚度 2~5 m, 北西向延伸长度约 1000 m. 初步估计石墨矿床规模达大型, 储量大于 100×10^4 t.

1998~1999 年, 法国地质矿产研究所 (BRGM) 对该石墨矿床进行了地质勘查. 根据部分钻孔含矿层分析结果来看, 石墨含量一般在 3%~5%, 石墨的碳含量在 60%~70%, 矿层厚度大于 12.9 m (详见表 1).

表 1 Toamasina 石山石墨矿钻孔矿层及品位统计表
Table 1 Statistics for ore-bearing bed and grade in boreholes of Toamasina graphite deposit

钻孔编号	终孔深度/m	矿层编号	矿层位置/m	石墨含量/%	碳含量/%	总矿层厚度/m
A1	40.10	1	2-12	2.82-5.45	55.2-78.4	20
		2	20-30	3.03-5.35	53.0-90.0	
A2	25.10	1	6.7-14	4.24	81.6-86.8	13.3
		2	16-22	3.53-6.86	83.8-92.0	
A4	32.00	1	0-4.2	2.85-3.46	90.0-91.2	22
		2	11.5-29.3	1.81-7.47	71.0-87.0	
A5	19.80	1	0-3.6	2.82-4.84	77.8-84.2	12.9
		2	3.6-10	1.21-4.54	76.0-85.8	
		3	12.7-15.6	1.71-2.32	86.2-90.6	
A6	26.35	1	0-4.7	8.46-10.50	64.4-64.6	18.65
		2	7.2-14.7	7.67-11.81	60.6-71.4	
		3	18-26.35	2.22-6.06	67.8-77.8	

矿石呈鳞片变晶结构、片麻状构造. 矿石主要矿物组成为石墨、石英、长石、夕线石、绢云母, 次要矿物为黑云母、白云母等. 石墨与绢云母共生. 石墨呈钢灰色, 鳞片状、聚片状或星散状较均匀分布, 粒径一般为 0.05~1.5 mm, 最大可达 5 mm, 多呈集合体, 具定向构造或浸染状构造.

Toamasina 石山石墨矿床产于前寒武系 Graphite

变质岩系 Manampotsy 群地层中. 该岩系由一套富含石墨的高铝片岩、片麻岩, 夹有石英岩等副变质岩系组成, 其原岩为陆源浅海沉积产物, 形成于新太古代末—古元古代. 石墨矿体呈层状、似层状、透镜状产出, 与容矿围岩呈明显的整合接触关系, 产于片岩、片麻岩与混合岩的过渡部位, 属于典型的区域变质型石墨矿床.

3 资源潜力评价分析

马达加斯加石墨矿床全部赋存于前寒武系新太古代末—新元古界地层中, 赋矿地层属于 Graphite 岩系, 分为 4 个群(组): 1) Andriba 群, 岩性为含石墨混合片麻岩; 2) Ambatolampy 群, 岩性为含石墨云母片岩、含石墨云母片麻岩; 3) Manampotsy 群, 岩性为石墨混合片麻岩; 4) Ampanihy 群, 岩性为含石墨长英片麻岩. 属于层控矿床或区域构造控矿, 而马达加斯加新太古代末—新元古代地层分布在马岛的东半部, 面积占马岛总面积的 1/3.

在马达加斯加, 石墨源来自富含碳沉积岩的变质作用, 即太古宇和元古宇组合中的碳酸岩或页岩的变质作用^[19-20]. 因此, 根据两种沉积类型, 许多沉积岩石很可能含有石墨沉积物, 即分散的石墨片状沉积物和变质变形中的石墨脉^{①②}. 这些脉可能是由二氧化碳含量非常高的变质流体中的碳沉淀形成的, 因为在沉积盆地南部花岗岩体中矿物(石英、石榴石等)流体包裹体中已经观察到碳质包裹体的存在^[21-22].

在马达加斯加石墨及潜力资源分布图(图 3)中可以看出, 马达加斯加石墨矿床分布范围广, 纵贯马达加斯加南北 1404 km, 东西跨度 426 km. 石墨矿产潜力分布区面积达 13.1×10^4 km², 石墨矿床 17 处, 矿点(矿化点)50 余处^③. 世界上超大型晶质石墨矿床位于马达加斯加岛的东部、东南部及南部. 东部 Toamasina (Tamatave) 地区包括历史悠久的 Andasibe-Perinet 石墨矿床. 东面是 Antsirakambo 石墨矿床, 再往南是靠近 Vatomandry 地区 Marovintsy 石墨矿床. 所有这些石墨矿床都位于 Manampotsy 群(组)地层中, 该群(组)是最有利于发生石墨的岩性. Ambatolampy 群(组)和

① Sutipin D M. Descriptive model of disseminated flake graphite//Orris G J, et al. eds. Some Industrial Mineral Deposit Models. 1991.

② Sutipin D M. Descriptive model of graphite veins//Orris G J, et al. eds. Some Industrial Mineral Deposit Models. 1991.

③ Tucker R D, et al. Cartes Géologique et Métallogéniques de la République de Madagascar à 1/1 000 000. 2012.

Sofia 群(组)也是含石墨层位^{①②③}。马达加斯加南部 Domaine Androyen 地质单元也有大量鳞片状石墨^④。

从北部 Ambatomitamba 至南部 Marovintsy 面积约 800 km² 的范围内,矿体赋存在云母片麻岩和片岩组成的硅质沉积变质岩中,矿带延伸约 500 km,集中了大中型石墨矿产地 8 处,资源储量超过 1×10⁸ t。在从 Tamatave 到 Ambalahasina 延伸约 70 km 的地区,有 10 个主要矿山。矿体长千余米,厚 3~30 余米。石墨晶体呈大粒粗鳞片状,石墨平均开采品位为 4%~11%。

总体而言,根据马达加斯加石墨矿床的成矿背景、矿产成矿规律、分布特征及矿床勘探的实例等因素综合分析,马达加斯加晶质石墨矿产资源量达 2×10⁸ t 以上。

4 结论

通过广泛的资料收集整理,大致查明马达加斯加石墨矿产成矿规律、资源潜力及远景储量。马达加斯加石墨具有独特的成矿地质条件,在世界范围内具有优势的非金属矿产。主要认识如下:

1) 马达加斯加石墨矿产主要成矿类型为沉积变质型和变质流体型,有重要经济价值的石墨矿产为沉积变质型晶质石墨。沉积变质型石墨矿产主要分布在 Anosyen-Androyen 构造单元 Ampanihy 和 Beraketa 的高应力区域, Antananarivo 构造单元东西两侧的 Angove 剪切带、Betsimisaraka 缝合带和 Manampotsy 富含石墨的剪切带中。沉积变质型石墨成矿时代为新太古代与古元古代,变质流体型石墨矿产成矿时代为中生代。

2) 马达加斯加石墨矿分布广,石墨矿床多为中大型或超大型,品位高,粒度大,石墨几乎全部为大片晶质石墨。无论储量和质量均名列世界前茅,资源潜力广阔。矿体易勘探、易开采、易选冶,经济前景广阔。

参考文献:

- [1] Wu D T, Ramaniraka J I, Xu F M, et al. Characteristics and potential analysis of Madagascar hydrocarbon-bearing basins[J]. *China Geology*, 2019, 2: 56-66.
- [2] 吴大天, 周永恒, 赵院冬, 等. 钒钛磁铁矿床的透岩浆流体成矿模型——来自马达加斯加扎卡岩体的证据[J]. *中国地质*, 2017, 44(4): 737-754.
- [3] 杨喜安. 马达加斯加 Maevatanana 金矿床岩浆混合成矿作用[J]. *地质学报*, 2015, 89(8): 1437-1447.
- [4] 赵院冬, 吴大天, 赵君, 等. 马达加斯加 Tsaratanana 绿岩带地质组成和主要矿产特征[J]. *中国矿业*, 2018, 27(5): 88-93, 127.
- [5] 赵君, 汪月华, 许逢明, 等. 马达加斯加阿巴通德拉扎卡地区钒钛磁铁矿床地质及物化探特征[J]. *地质与资源*, 2014, 23(2): 192-196.
- [6] 吴大天. 马达加斯加扎卡钒钛磁铁矿床地质特征与成因探讨[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [7] 车继英, 赵院冬, 王奎良, 等. 马达加斯加前寒武纪变质基底特征综述[J]. *地质与资源*, 2013, 22(4): 340-346.
- [8] 周久龙, 邵帅, 吴大天, 等. 新元古代地幔柱事件在 Rodinia 超大陆西缘的响应: 来自马达加斯加的初步证据[J]. *岩石学报*, 2014, 30(11): 3366-3374.
- [9] Zhou J L, Shao S, Luo Z H, et al. Geochronology and geochemistry of Cryogenian gabbros from the Ambatondrazaka area, east-central Madagascar: Implications for Madagascar-India correlation and Rodinia paleogeography[J]. *Precambrian Research*, 2015, 256: 256-270.
- [10] 梁艳宾. 马达加斯加图利亚省安巴希塔石墨矿区工程地质条件浅析[J]. *中小企业管理与科技(上旬刊)*, 2019(11): 162-163.
- [11] 孙振一, 白浩, 方焯, 等. 马达加斯加石墨矿床控矿构造特征与找矿模型[J]. *地质力学学报*, 2019, 25(S1): 145-149.
- [12] 杨明建, 狄永军, 张达, 等. 马达加斯加 Antanisoa 石墨矿床成因分析[J]. *矿床地质*, 2020, 39(2): 381-396.
- [13] 刘光, 张雪梅. 马达加斯加矿产资源分布及优劣势分析[J]. *世界有色金属*, 2019(5): 101-102.
- [14] 李文昊. 马达加斯加东海岸 Vohitasara 石墨矿成因探讨[D]. 北京: 中国地质大学, 2018.
- [15] Rolin P. Présence de décrochements précambriens dans le bouclier méridional de Madagascar: implications structurales et géodynamiques [J]. *Comptes Rendus Académie des Science*, 1991, 312: 625-629.

① Yager T R. The mineral industry of Madagascar/U.S. Geological Survey, Minerals Yearbook 2002, v. III, Area Reports — International: Washington DC. 2003.

② Peters S G., et al. Rédacteurs. Phase I — Compilation de données et construction des jeux de données; Une étude de l'effet futur des minéraux, de L'hydrologie, et de l'écologie sur le développement économique régional intégré dans la région d'Anosy, Madagascar, avec des contributions de Jacoby, C., Gillingham, W. Doblin, J.A., Hammarstrom, J., Francois, F., Lampietti, M.J., Mack, T.J. D.M. Sutphin, traduction par F.I. Mihalasky: Proprietary report submitted to World Bank, 8 DVDs submitted to Du Projet de Gouvernance Des Ressources Minérales (PGRM), Madagascar (Vol. I). 2005.

③ GAF-BGR. Explanatory notes for the Androyen Domain southern Madagascar. Réalisation des travaux de cartographie géologique de Madagascar, révision approfondie de la cartographie géologique et minière aux échelles 1/100 000 et 1/500 000 zone Sud. République de Madagascar. 2008.

④ Tucker R D, et al. Cartes Géologiques et Métallogéniques de la République de Madagascar à 1/1 000 000. 2012.

- 其地层意义[J]. 中国地质科学院沈阳地质研究所刊, 1985, 11: 47-113.
- [13]李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 等. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究[J]. 矿物学报, 2009, 29(S1): 600-601.
- [14]李怀坤, 朱士兴, 相振群, 等. 北京延庆高于庄组凝灰岩的锆石 U-Pb 定年研究及其对华北北部中元古界划分新方案的进一步约束[J]. 岩石学报, 2010, 26(7): 2131-2140.
- [15]Ludwig K R. User's Manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003: 1-70.
- [16]余静贤, 蒲荣干, 吴洪章, 等. 辽西热河群上亚群孢粉组合[J]. 中国地质科学院院报, 1986(2): 93-119.
- [17]张立君, 蒲荣干, 吴洪章, 等. 辽宁西部中生代地层古生物(二)[M]. 北京: 地质出版社, 1985: 121-212.
- [18]秦涛, 李林川, 钱程, 等. 内蒙古扎兰屯地区龙江组孢粉组合及其地质意义[J]. 地质通报, 2018, 37(9): 1571-1578.
- [19]任凤和, 杨晓平, 李迎春, 等. 黑龙江省东部鸡西群地层时代划分及地质意义[J]. 中国地质, 2005, 32(1): 48-54.
- [20]杨晓平, 马永强, 郝永鸿, 等. 黑龙江省东部鸡西群穆棱组年代地层划分[J]. 地质与资源, 2005, 14(3): 166-169.
- [21]张渝金, 杨雅军, 蔡闹, 等. 大兴安岭中段龙江盆地热河生物群化石组合及生存时限——来自生物地层、年代地层新证据[J]. 地质学报, 2018, 92(1): 197-214.

(上接第 428 页 /Continued from Page 428)

- [24]赵书跃, 庞雪娇, 李德胜. 黑龙江三道湾子金矿含金石英脉与围岩地球化学及地质意义[J]. 地质与资源, 2016, 25(2): 130-136, 175.
- [25]闫文强, 高树学, 杨凤喜, 等. 五道沟金矿床控矿因素及找矿方向[J]. 黄金科学技术, 2008, 16(3): 43-44, 48.
- [26]曲晖, 赵忠海, 李成禄, 等. 黑龙江永新金矿地质特征及成因[J]. 地质与资源, 2014, 23(6): 520-524.
- [27]Li C L, Li L, Yuan M W, et al. Study on pyrite thermoelectricity, ore-forming fluids and H-O-Rb-Sr isotopes of the Yongxin gold deposit, Central Asian Orogenic Belt: Implications for ore genesis and exploration [J]. Ore Geology Reviews, 2020, 121: 103568.
- [28]梁科伟, 赵忠海, 郭艳. 原生晕在深部成矿预测中的应用——以黑河地区永新金矿为例[J]. 地质与资源, 2019, 28(6): 512-518.

(上接第 445 页 /Continued from Page 445)

- [16]Pili é, Ricard Y, Lardeaux J M, et al. Lithospheric shear zones and mantle-crust connections [J]. Tectonophysics, 1997, 280 (1/2): 15-29, doi: 10.1016/S0040-1951(97)00142-X.
- [17]Martelat J E, Lardeaux J M, Nicollet C, et al. Strain pattern and late Precambrian deformation history in southern Madagascar [J]. Precambrian Research, 2000, 102(1/2): 1-20, doi: 10.1016/S0301-9268(99)00083-2.
- [18]De Wit M J, Bowring S A, Ashwal L D, et al. Age and tectonic evolution of Neoproterozoic ductile shear zones in southwestern Madagascar, with implications for Gondwana studies [J]. Tectonics, 2001, 20(1): 1-45.
- [19]Simandl G J, Kenan W M. Crystalline flake graphite [M]//Geological Fieldwork 1997. Columbia: British Columbia Ministry of Employment and Investment, 1997: 24P-1-24P-3.
- [20]Simandl G J, Kenan W M. Vein graphite in metamorphic terrains [M]//Geological Fieldwork 1997. Columbia: British Columbia Ministry of Employment and Investment, 1997: 24Q-1-24Q-3.
- [21]Ramambazafy A. Granites et fluides en relation avec les skarns à thorianite dans les granulites du SE de Madagascar [D]. Toulouse: Paul Sabatier University, 1998: 1-302.
- [22]Ramambazafy A, Moine B, Rakotondrazafy M, et al. Signification des fluides carboniques dans les granulites et les skarns du Sud-Est de Madagascar [J]. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences—Series IIA—Earth and Planetary Science, 1998, 327(11): 743-748.
- [23]Fitzsimons I C W, Hulscher B. Out of Africa: Detrital zircon provenance of central Madagascar and Neoproterozoic terrane transfer across the Mozambique Ocean [J]. Terra Nova, 2005, 17(3): 224-235.