DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.05.062

文章编号: 1006-6616 (2021) 05-0759-09

东南极南查尔斯王子山条带状含铁建造 (BIF) 的基本特征及成矿潜力

李 淼^{1,2,3}. 刘晓春^{1,2,3}

LI Miao^{1,2,3}, LIU Xiaochun^{1,2,3}

1. 中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081;

2. 中国地质调查局极地地质研究中心,北京 100081;

3. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室,北京 100081

1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

2. Research Center of Polar Geosciences, China Geological Survey, Beijing 100081, China;

3. Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China

LI M, LIU X C, 2021. Basic characteristics and metallogenic potential of banded iron formation (BIF) in the southern Prince Charles Mountains, East Antarctica [J]. Journal of Geomechanics, 27 (5): 759 -767. DOI: 10.12090/j. issn. 1006-6616. 2021. 27. 05. 062

Abstract: Banded iron formation (BIF) occurs in the lower part of the Paleoproterozoic Ruker Group at Mount Ruker, southern Prince Charles Mountains in East Antarctica. Of all depositional sequence of the Ruker Group, at least 400 m is of iron-bearing formation and 30 ~ 70 m is of ore body with an average grade of total Fe about 33.5%. The formation process of the BIF may be related to metamorphic volcanic rocks and the BIF may belong to the transitional type between the Lake Superior type and the Algoma type in genetic classification. High precision aeromagnetic survey identified two major, 10-km-wide, positive aeromagnetic anomalies extending westward from Mount Ruker for 50 km in the north and 60 km in the south, respectively. Based on the aeromagnetic anomaly and high-precision magnetic anomaly data, the prediction model and the distribution range of the BIF are established. The recoverable iron ore resources are finally estimated to be more than ten billion tons.

Key words: banded iron formation; metallogenic potential; southern Prince Charles Mountains; East Antarctica

摘 要:东南极南查尔斯王子山条带状含铁建造(BIF)产于鲁克山古元古代鲁克群的底部,总厚400m, 矿体厚度30~70m,铁矿平均品位33.5%。该条带状含铁建造形成过程可能与变质火山岩有联系,在成 因分类上属于苏必利尔湖型含铁建造和阿尔戈马型含铁建造之间的过渡类型。高精度航磁测量在鲁克山 圈定出宽约10km的北、南两条磁异常条带,延长分别约为50km和60km。据此初步建立该地区沉积变 质型铁矿预测模型,圈定了含铁建造的资源分布范围,最终估算出铁矿石可开采的资源量大于百亿吨。 关键词:条带状含铁建造;成矿潜力;南查尔斯王子山;东南极

中图分类号: P618.31 文献标识码: A

收稿日期: 2021-07-20; 修回日期: 2021-09-16; 责任编辑: 范二平

基金项目: 国家自然科学基金 (41941004)

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41941004)

第一作者简介:李淼 (1973—),女,博士,副研究员,从事极地地质研究工作。E-mail: limiao331@ sohu. com

引用格式: 李淼, 刘晓春, 2021. 东南极南查尔斯王子山条带状含铁建造(BIF)的基本特征及成矿潜力[J]地质力学学报, 27 (5): 759-767. DOI: 10.12090/j. issn. 1006-6616. 2021. 27. 05. 062

0 引言

2020年,一场席卷全球的新冠疫情导致除中 国以外的全球主要经济体出现明显衰退,波罗的 海指数显示中国铁矿石需求呈现首次连续三年增 长的趋势,表明国内经济发展进一步企稳和逐渐 恢复。然而,中国自身铁矿石品位低,资源禀赋 较差、开发利用成本高,导致近年来国内铁矿石 对外依存度持续居高不下;另一方面,以澳大利 亚力拓 (RIO)、必和必拓 (BHP) 和巴西淡水河 谷 (VALE) 三大公司为代表的巨头促使全球铁矿 供应格局向着更为垄断和集中的方向发展 (赵立 群等,2020)。面对风起云涌的日益复杂的国际形 势,本着未雨绸缪的出发点,进一步摸清南极地 区铁矿石矿产资源的分布、成矿地质背景和成矿 潜力具有长远的极其重要的战略意义。

在整个南极大陆,除西福尔丘陵(Vestfold Hills)、威尔克斯地(Wilkes Land)和邦杰丘陵(Bunger Hills)等局部地区有少量含铁建造及其转石外,在毛德皇后地(Dronning Maud Land)中西部的紫苏花岗岩侵入体的接触带中也发现有少量脉状铁矿石,而主要的前寒武纪含铁建造出露在南查尔斯王子山(Southern Princes Charles Mountains)和恩德比地(Enderby Land)(Tingey,

1990; 陈廷愚, 1996)。其中南查尔斯王子山被认 为是最具铁矿资源潜力的地区,也是距中国科考 站最近的矿产资源,距离中山站约 600 km,相对 来说也是最便于运输和开发利用的矿产资源。文 章重点总结了南查尔斯王子山条带状含铁建造 (BIF)的基本特征,综合该区基础地质和包括航 磁异常、高精度磁异常等在内的地球物理资料, 初步探讨了该含铁建造的成矿潜力和资源利用价 值,继而为南极地区将来潜在的可开发资源的综 合利用提供地质依据。

1 区域地质背景

查尔斯王子山是在 1947 年美国海军飞机高空 跳伞演习中首次被发现的,并在 1954 年由澳大 利亚南极考察队命名。查尔斯王子山沿兰伯特冰 川(Lambert Glacier)-埃默里冰架(Amery Ice Shelf)流域的西缘出露,总体延伸长度超过 500 km,基本上是东南极地盾出露最好的连续露头 (图 1a)。在地貌上查尔斯王子山呈离散的冰原岛 峰和陡峭的平顶山分布在东南极兰伯特冰川-埃 默里冰架的西缘,其地貌景观明显受兰伯特冰川-埃 默里冰架的西缘,其地貌景观明显受兰伯特冰川 及其支流的控制,而兰伯特冰川最终汇入埃默里 冰架并与普里兹湾(Prydz Bay)相连接(Tingey, 1982)。



a—查尔斯王子山-普里兹湾地区地质简图 (刘晓春, 2009); b—图 a 中的鲁克地体地质简图 (据 Phillips et al., 2005 修改)

图1 查尔斯王子山-普里兹湾地区地质简图和鲁克地体地质简图 (图中黑色区域为岩石露头)

Fig. 1 Geological sketch map of the Prince Charles Moutains-Prydz Bay region showing its location in East Antarctica (a) and Geological sketch map of the Ruker terrane (b)

a is after Liu, 2009; b is modified after Phillips et al., 2005; The black areas represent outcrops.

根据已有的地质年代学数据(Mikhalsky et al., 2001; Phillips et al., 2006; Boger et al., 2006; 刘晓春, 2009),查尔斯王子山从北向南依次可以划分为中—新元古代雷纳杂岩(Rayner Complex)、中元古代费希尔地体(Fisher Terrane)、古元古代兰伯特地体(Lambert Terrane)和太古宙鲁克地体(Ruker Terrane)。

雷纳杂岩主要由长英质-镁铁质正片麻岩夹副 片麻岩和花岗岩、紫苏花岗岩组成,总体经历了 格林维尔期麻粒岩相变质、变形和大量岩浆作用, 之后经过泛非期变质作用改造并伴随有花岗岩和 伟晶岩侵位,一般可达麻粒岩相(Carson et al., 2000; Boger et al., 2002; Halpin et al., 2007, 2012; Morrissey et al., 2015, 2016)。费希尔地体 主要为变质侵入岩、变质双峰式钙碱性火山岩和 变沉积岩组成, 经历了比雷纳杂岩变质程度更低 的格林维尔期变质作用 (Beliatsky et al., 1994; Mikhalsky et al., 1996, 1999), 并且在变泥质岩中 发现有泛非期变质作用改造 (De Vries Van Leeuwen et al., 2019)。兰伯特地体由古元古代正 片麻岩、变沉积岩和少量花岗岩脉组成, 记录了 格林维尔期岩浆变质作用 (Corvino et al., 2008; Phillips et al., 2009), 南部正片麻岩发现有泛非期 变质作用改造和花岗岩侵入(Boger et al., 2008)。

鲁克地体主要由太古宙鲁克杂岩(又称廷吉杂

岩 (Tingey Complex)) 组成,其主体由中太古代 (3190~3170 Ma) 花岗质片麻岩基底构成 (Boger et al., 2006; Mikhalsky et al., 2006), 上覆门席斯群 (Menzies Group)、斯蒂尼尔群 (Stinear Group)、鲁 克群(Ruker Group)和Sodruzhestvo群四个不同时 代的变质沉积岩和变质火山岩系列(图 1b. 图 2; Phillips et al., 2005, 2006, 2007)。门席斯群主要为 中太古代 (3150 Ma 之后沉积) 砾岩、石英岩、泥 质或钙质变沉积岩和角闪岩:斯蒂尼尔群为新太古 代(2800 Ma之后沉积)石英岩;鲁克群为古元古 代(2500 Ma之后沉积)绿片岩相镁铁质-长英质变 质火山岩、变质粗玄岩岩床、变泥质片岩、板岩、 千枚岩和条带状铁矿石: Sodruzhestvo 群为一套推测 时代为中一新元古代(1040 Ma之后沉积)、成分更 偏钙质的绿片岩相变质沉积岩组合,包括变泥质岩、 钙质片岩、千枚岩和板岩,含少量大理岩、石英岩 和变质砾岩 (Mikhalsky et al., 2001), 该岩石系列 局部保留了波痕构造和交错层理等原始沉积构造的 特征 (Phillips et al., 2005)。有证据表明鲁克地体 的基底和上覆门席斯群盖层在太古代(2790~ 2770 Ma) 一起发生了高角闪岩相变质作用, 随后伴 有 2650 Ma 的伟晶岩脉侵入 (Boger et al., 2006)。 在泛非期发生了包括 Sodruzhestvo 群在内的低角闪岩 相-绿片岩相变质作用,伴随局部花岗岩的侵位 (Mikhalsky et al., 2001)



图 2 南查尔斯王子山年代地层学划分 (据 Phillips et al., 2006 修改)

Fig. 2 Regional chronostratigraphic division for the southern Prince Charles Mountains (modified after Phillips et al., 2006)

2 南查尔斯王子山 BIF 的基本特征

2.1 地质产状

南查尔斯王子山最主要的条带状含铁建造呈北西 走向,出露在鲁克山(Mount Ruker)的鲁克群变沉 积岩层序中,不整合覆盖在鲁克山东端的太古宙花岗 质片麻岩之上(图3)。变质沉积岩序列可分为上部 火山-沉积岩系和下部火山岩系。这些岩石均以构造 板片的形式出现,构造方向与面理一致,优势走向北 西向,向南西倾,倾角30°~75°,显示了构造叠加和 逆冲构造作用的影响(Mikhalsky et al., 2001)。



图 3 鲁克山地质简图 (Mikhalsky et al., 2001)

Fig. 3 Geological sketch map of Mount Ruker (Mikhalsky et al., 2001)

上部火山-沉积岩系由磁铁矿-云母-石英板岩 (变泥质岩)、绿泥石-云母-石英板岩和石英岩 (变质凝灰岩、凝灰质砂岩、砂岩)、方解石-云 母-斜长石-石英板岩(长英质变质火山岩)、变质 砾岩和凝灰质角砾岩组成;下部火山岩系主要由 黑绿色—灰绿色变质玄武岩和绿泥石-阳起石片岩 (40%)、变质中酸性火山岩(20%)、变质粗玄岩 (25%)和条带状含铁建造(15%)组成。条带状 含铁建造呈透镜状或薄层状出露在火山岩系的下 部,主体含铁建造(碧玉岩)总厚度达400 m (Ravich et al., 1982; Mikhalsky et al., 2001)。较 薄的矿层夹绿泥石-碳酸盐片岩、钙质石英岩、变 质砂岩、变质粉砂岩和变质基性火山岩,可见铁 矿层与硅质岩层同时发生褶皱变形,如半波纵弯 褶皱、扁平同心褶皱和尖顶褶皱等(Mikhalsky et al.,2001)。在条带状含铁建造的顶部近构造接触带的部位可见含铁建造和变质辉长岩之间呈侵入接触的构造关系,变质辉长岩侵入到碧玉铁质岩形成0.3~0.5 m的冷凝边(Ravich et al.,1982)。 此外,接触带中的变质基性岩被强烈剪切变形成绿片岩相岩石,片理平行于周围的含铁岩石。

由于鲁克山基岩露头有限,地势险峻,加之已经完成的野外工作也非常有限,造成有关条带状铁矿建造的具体厚度的估算仍有很大的不确定性。Soloviev et al. (1967)在基岩露头(73°38'S;68°40'E)发现的含铁建造层厚约70m; England and Langworthy (1975)则估计了一个可见的750m 厚的条带状含铁矿建造,但这一厚度可能远大于含铁建造(矿层)的真实厚度; Ravich et al. (1982)曾描述鲁克山含条带状铁矿层位的总厚度 近 400 m,其在鲁克山最东端连续陡崖的一个大的 露头(长1 km、厚 100~150 m)中识别出 30~ 50 m 厚的含铁建造。Ravich et al.(1982)认为含 铁建造与层状片岩(石英片岩、石英-绿泥石片岩 和云母-绿泥石片岩)、微粒石英岩和变质基性岩 呈互层产出,含铁建造呈薄层状,强烈褶皱变形, 轴面为北西—南东向 60°~70°。由此可见,鲁克山 不同地点的含铁建造厚度应有所差异,大致位于 30 m 至 70 m 之间。

2.2 矿石矿物特征

鲁克山条带状含铁建造呈灰黑色和淡紫黑色, 主要由 1~2 cm 厚的不透明矿物层和 2~3 cm 厚的 石英层组成。不透明矿物层主要由粒度从 0.05 mm 到 0.8~1.0 mm 不等的具粒状变晶结构的磁铁矿和 褐铁矿以 3:2的比例呈多面聚集体组成,在不透明 矿物层中,可见透镜状淡色的不超过 2~3 mm 的微 纹层,由石英和微小的半自形的不透明矿物组成 (Ravich et al., 1982)。主要的石英层包含呈透镜 状产出的粒状磁铁矿和褐铁矿颗粒聚集体 (15%~ 20%),或作为不规则包裹体出现在石英层中。在 一些不透明矿物层中,镜下可见赤铁矿被磁铁矿 取代,磁铁矿和赤铁矿又被褐铁矿取代的现象 (Ravich et al., 1982)。

除了石英和不透明矿物外,含铁建造还包含菱 铁矿、铁白云石、白云石和方解石等碳酸盐矿物以 及钠闪石、微斜长石和钠长石,有些岩石还含有黑 硬绿泥石和磷灰石 (Mikhalsky et al., 2001)。针状、 长柱状或呈聚合变晶集合体的钠闪石和微斜长石、 钠长石和云母被包裹在主要的薄层中;钠长石和 微斜长石通常以薄层状分布在不透明矿物层与石 英接触的部位;大量的次生碳酸盐矿物大多沿岩 层层面分布,局部可见菱铁矿聚集在磁铁矿集合 体周围 (Ravich et al., 1982)。在角砾岩化的含铁 建造中,含铁建造甚至与石英聚合体、方解石和 菱铁矿相胶结,最大的角砾还包含了黄铁矿和重 结晶的赤铁矿 (Ravich et al., 1982)。

对一些含铁建造的矿石化学分析显示 SiO₂ 含 量为 29.8%~61.4%, 全铁含量 24.1%~45.9%, 平均为 33.5% (Tingey, 1991), 其他氧化物的总 量不超过 6%~7%, S 和 P 的含量均较低,此外含 有 0.2%的 Ni, Cu、Cr、Co、Zr 的含量在 0.001%~ 0.01%之间 (Ravich et al., 1982), Pb 和 Zn 含量 也较低 (Mikhalsky et al., 2001)。

2.3 地球化学特征及成因

最新的地球化学研究表明,鲁克山条带状含 铁建造具有低 Al、Zr、Hf 和 Sc 含量的特点,稀土 总量较低,亏损 Nd,稀土配分模式与镁铁质变火 山岩类似, 说明条带状含铁建造的形成过程可能 与变质火山岩有联系 (Ernst and Bau, 2021), 在 铁建造的分类上属于介于苏必利尔湖型含铁建造 和阿尔戈马型含铁建造之间的过渡类型 (Mikhalsky et al., 2001)。燧石层富集 Ni 并具有高 Ba/Sr 比值,类似其他早前寒武纪条带状含铁建造 的特征 (Ernst and Bau, 2021)。页岩标准化稀土 配分模式图中表现为类似于现代海水的稀土配分 模式,如亏损轻稀土,富集重稀土,具有 La、Gd 和 Y 正异常等地球化学特征; 但是相对海水又显 示具有 Eu 正异常、无 Ce 异常 (Ernst and Bau, 2021)。这些特征表明高温热液作用在大气圈-水 圈处于还原条件下,将 REE 和 Y 元素加入到海水 之中。高于球粒陨石的 Y/Ho 比值表明含铁建造的 条带并不是铁质沉积之后分离形成的,而是原始 同沉积构造作用形成的(Ernst and Bau, 2021)。 因此,南查尔斯王子山条带状含铁建造可能是由 海底热液喷流形成的,为热水沉积成因。每次海 底热液喷溢活动都造成 Si 和 Fe 依次先后沉淀, 分 别形成硅质层和铁质层。海底热液喷气的周期性 活动形成了具明显条带状构造的含铁建造,一套 韵律层也相应地代表了一次海底热液喷溢活动。

3 查尔斯王子山的磁异常特征

由于南极大陆 98% 的地表面积被冰雪覆盖, 基岩露头出露极其有限,因此基于地球物理学上 的航空重力、磁力和冰雷达等探测手段对于进一 步认识南极冰下大陆的基底特征、构造格架及构 造演化有重大意义。

早期对查尔斯王子山-埃默里冰架的航磁调查 表明,航空磁测数据显示出两条宽度约 5~10 km 的正磁异常条带,并从南查尔斯王子山鲁克山地 区向西延伸约 120~180 km,该异常被认为是向西 延伸的条带状含铁矿建造引起的(Ravich et al., 1982)。Golynsky et al. (2002)收集了近五十多年 来的航空磁测资料,汇编出了最完整的南极航磁 轨迹图和磁异常图;基于兰伯特冰川-查尔斯王子 山脉地区详细的航磁数据,利用 ER Mapper 软件系

布,南查尔斯王子山最显著的磁异常是呈近东西向展布,与鲁克山条带状含铁建造有关 (Golynsky et al., 2002)。



a—埃默里冰架、兰伯特冰川及查尔斯王子山地区航磁异常图 (据 Golynsky et al., 2002 修改); b—南查尔斯王子山鲁克地体磁异常区划分 图 (据 McLean et al., 2008 修改)

图 4 埃默里冰架、兰伯特冰川及查尔斯王子山地区航磁异常图和南查尔斯王子山鲁克地体磁异常区划 分图

Fig. 4 Colour shaded-relief map of the magnetic anomalies for the Amery Ice Shelf, Lambert Glacier and Prince Charles Mountains (a) and Magnetic signature of the geophysical domains in the southern Prince Charles Mountains (b)

a is modified after Golynsky et al. , 2002; b is modified after McLean et al. , 2008.

南查尔斯王子山鲁克山地区的磁异常走向呈 东西向,长约130km,明显具有高强度、高振幅、 长波长的特征,磁异常的峰值为3351nT,南侧边 缘则显示较陡的地磁梯度异常;而周边其他地区 主要为短波长、低振幅、低地磁梯度异常 (Golynsky et al., 2002, 2006; McLean et al., 2008)。 根据磁异常特征, McLean et al. (2008)还将南查 尔斯王子山划分为四个区域,由东北向西南依次 划分为东北区、高磁异常区、低磁异常区和高振 幅区,分别代表不同的磁场强度、结构和构造方 向(图4b)。其中,高振幅区包括了伯德山、鲁克 山和贝利斯山等地的露头,在鲁克山的北北东端 具有最陡的地磁变化梯度(642 nT/km),振幅最高达4500 nT,该区域最明显的特征是有两条宽约10 km的东西向展布的高磁异常区域,北部的一条大约50 km长并向西收窄约5 km,南侧的一条相对略长并向西方向延伸60 km (McLean et al.,2008),这两条磁异常带对应鲁克山条带状含铁建造的空间展布。另外,鲁克山条带状含铁建造279件样品的磁化率在(118~80830)×10⁻⁵ SI之间,平均为27483×10⁻⁵ SI (McLean et al.,2008)。

4 条带状含铁建造的成矿潜力分析

航磁异常通常是 BIF 在区域上最有效的找矿标志,在矿产勘查中得到广泛应用。高精度磁测通 常可以作为铁矿体空间形态和矿石质量的重要判 断依据,一般来说,高磁异常梯度带对应矿体顶 板位置,指示矿体的倾向,梯度带的缓急与铁矿 体倾角相关;高磁异常的宽度,指示了磁铁矿体 或矿体群分布范围;磁异常的极值大小,预示矿 体稳定性和深部延伸规模 (曾瑞垠等,2020)。

由于目前缺乏实地踏勘路线及测量资料,文 中试图通过利用高精度磁测资料对南查尔斯王子 山条带状含铁建造进行资源量预测,并对其成矿 潜力做简要分析。通过对航磁异常区的磁测剖面 测量,圈定出鲁克山条带状含铁建造包含北侧矿 体和南侧矿体两个异常带(McLean et al., 2008; 图 4b)。利用航空磁测资料对查尔斯王子山做三维 反演模拟的结果表明,北侧矿体为层状结构,走 向近东西向,长约 50 km,并以约 45°角向南倾斜 至地表深度 7 km 以下,厚度约为 2 km;南侧矿体 为一个较厚(约 5 km)的地质体,也是向南陡倾, 在地表以下约 8 km 处突然尖灭(McLean et al., 2008)。根据鲁克山条带状含铁建造的矿床地质特 征及产出环境,结合物探特征等建立了该地区沉 积变质型铁矿预测模型,见表 1 所示。

通常来说,铁矿石的论证并达到工业指标为 边界品位 TFe 为 10.00%,工业品位 TFe 为 13.00%,可采厚度 2.00 m,夹石剔除厚度 2.00 m (万平益等,2020)。鲁克山条带状含铁建造中铁矿 石标本的铁矿石品位在 24.1%~45.9%之间,平均 为 33.5% (Tingey, 1990),厚度 30~70 m,完全 达到工业可采化标准。

资源量预测主要参考了万平益等(2020)运

表 1 南查尔斯王子山鲁克地体条带状含铁建造铁矿预测 模型

Table 1The metallogenetic prospect model of iron ore inbanded iron formation in the Ruker Terrane, southern PrinceCharles Mountains

成矿要素	
构造位置	南查尔斯王子山鲁克地体古元古代沉积盆地北部边缘
赋矿岩层	磁铁石英岩
矿物组合	石英+磁铁矿+赤铁矿+白云石+方解石+钠闪石+硬绿泥 石+磷灰石
结构构造	同沉积构造,条带状构造
控矿构造	被南向逆冲断层和晚期东北向左旋剪切走滑断层控制
矿体规模	矿体产状与地层一致,主矿体为南北两个成矿带,北 侧矿体走向近东西向,长约50km,并以约45°角向南 倾斜至地下深度7km,厚度约30~70m;南侧矿体走 向也是近东西向,长约60km,也向南陡倾,在地表以 下约8km处尖灭,厚度也估算为30~70m
矿石品位	矿石品位在 24.1%~45.9%之间, 平均为 33.5%
矿石组构	矿石结构以细粒柱状、粒状变晶结构为主,条带状构造
物探特征	高振幅磁异常区基本圈定铁矿体的形态, 主体向南倾斜
注:根据]	Ravich et al. , 1982; McLean et al. , 2008 资料修改
用的方法	去和参数。鲁克山条带状铁建造矿体平均
倾角为。	45°,属于陡倾斜产出矿体,采用垂直投影

倾角为 45°,属于陡倾斜产出矿体,采用垂直投影 面积计算截面积;利用对航磁异常区的磁测剖面 测量的矿体面积进行圈算,求出预测矿体截面积 (S);预测真面积(S')=预测矿体截面积(S)/ sin45°。预测矿体体积(V')=预测真面积(S')× 含铁矿体的估算厚度。预测矿石量(Q')=预测矿 体体积(V')×矿石平均小体重(T)。其中,矿区 磁异常预测资源量计算时,参考类似的沉积型铁 矿石小体重与品位的线性相关关系,即:铁矿石 小体重值=2.74+0.026×铁品位(边荣春等, 2014),可以得出鲁克山条带状含铁建造的平均矿 石小体重(T)为2.75 t/m³。含铁矿体的估算厚 度按照 30~70 m 计算。

按照以上方法分别计算南北两条矿体的资源 量,得出北侧矿石总体资源量在408~953亿吨, 南侧矿石总体资源量在560~1307亿吨,南查尔斯 王子山铁矿石总资源量大致为968~2258亿吨(表 2)。因此,从成矿规模上来说,该铁矿石还是具 有超大型铁矿的成矿规模。虽然航磁异常推测深 度达7~8km,但目前铁矿的勘探深度主要集中在 地表以下1000m深度以浅(刘群等,2013),比 如具有明显的层控性的鞍本地区铁矿,许多大型、 超大型铁矿床勘探程度一般控制在沿倾斜延伸500~ 700m(张朋等,2012)。因此,对南查尔斯王子 山的铁矿资源来说,目前可开采的资源量在128~ 299亿吨(按照最大勘探深度1000m计算可采资 源量)。然而,由于南查尔斯王子山距离海岸过于 遥远,加之南极地区总体气候条件比较恶劣,从 经济学角度来说其总体开采和运输成本较高。鉴 于《南极条约》对南极的开发和利用仅仅以科学 研究为目的的局限性,南查尔斯王子山的铁矿资 源目前仍属于不可开采的区域范围。

表 2 南查尔斯王子山鲁克地体条带状含铁建造铁矿预测资源量

Table 2 The potential resource of iron ore in banded iron formation in the Ruker Terrane, southern Prince Charles Mountains

矿体	预测矿体截面积	预测真面积	倾角	矿体厚度/	预测矿体体积	小体重 (T) /	预测矿石量
	(S) /m ²	(S') /m ²		m	(<i>V'</i>) ∕m ³	(t/m ³)	(Q') /亿吨
北侧	$50 \times 10^{3} \times 7 \times 10^{3}$	495×10 ⁶	45°	30~70	$14850 \times 10^{6} \sim 34650 \times 10^{6}$	2.75	408 ~ 953
南侧	$60 \times 10^{3} \times 8 \times 10^{3}$	679×10^{6}	45°	30~70	$20370 \times 10^{6} \sim 47530 \times 10^{6}$	2.75	560~1307

5 结论

(1) 东南极南查尔斯王子山条带状含铁建造 出露在古元古代沉积盆地北部边缘,被南向逆冲 断层和晚期东北向左旋剪切走滑断层控制。主要 赋矿岩层为磁铁石英岩,矿层厚度 30~70 m,矿石 品位在 24.1%~45.9%之间,平均为 33.5%,达到 工业可采化标准。

(2)南查尔斯王子山航磁异常的分布特征与 鲁克山条带状含铁建造有密切关系。通过对该区 航磁异常、高精度磁异常解译及验证,圈定铁矿 石分布范围,最终采用岩体磁异常体积和矿石体 重的方法估算出铁矿石总资源量达千亿吨,在地 下1km以上的可开采资源量在百亿吨以上。

References

- BELIATSKY B V, LAIBA A A, MIKHALSKY E V, 1994. U-Pb zircon age of the metavolcanic rocks of Fisher Massif (Prince Charles Mountains, East Antarctica) [J]. Antarctic Science, 6 (3): 355-358.
- BIAN R C, HAN Y Z, WANG S C, et al., 2014. Regression analysis on small iron weight value and magnetic iron grade of Zhaicun iron deposit in Jiningcity [J]. Shandong Land and Resources, 30 (5): 57-58, 64. (in Chinese with English abstract)
- BOGER S D, CARSON C J, FANNING C M, et al., 2002. Pan-African intraplate deformation in the northern Prince Charles Mountains, east Antarctica [J]. Earth and Planetary Science Letters, 195 (3-4): 195-210.
- BOGER S D, WILSON C J L, FANNING C M, 2006. An Archaean province in the southern Prince Charles Mountains, East Antarctica: U-Pb zircon evidence for c. 3170 Ma granite plutonism and c. 2780 Ma partial melting and orogenesis [J]. Precambrian Research, 145 (3-4): 207-228.
- BOGER S D, MAAS R, FANNING C M, 2008. Isotopic and geochemical constraints on the age and origin of granitoids from the central Mawson Escarpment, southern Prince Charles Mountains, East Antarctica [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 155

(3): 379-400.

- CARSON C J, BOGER S D, FANNING C M, et al., 2000. SHRIMP U-Pb geochronology from Mount Kirkby, northern Prince Charles Mountains, East Antarctica [J]. Antarctic Science, 12 (4): 429-442.
- CHEN T Y, 1996. Main mineral resources of Antarctica [J]. Acta Geoscientica Sinica: Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 17 (1): 65-77. (in Chinese with English abstract)
- CORVINO A F, BOGER S D, HENJES-KUNST F, et al., 2008. Superimposed tectonic events at 2450 Ma, 2100 Ma, 900 Ma and 500 Ma in the North Mawson Escarpment, Antarctic Prince Charles Mountains [J]. Precambrian Research, 167 (3-4); 281-302.
- DE VRIES VAN LEEUWEN A T, MORRISSEY L J, KELSEY D E, et al., 2019. Recognition of Pan-African-aged metamorphism in the Fisher Terrane, central Prince Charles Mountains, East Antarctica [J]. Journal of the Geological Society, 176 (4): 785-798.
- ENGLAND R N, LANGWORTHY A P, 1975. Geological work in Antarctica-1974 [R]. Record. 1975/30, 19, Bureau of Mineral Resources, Geology and Geophysics, Canberra.
- ERNST D M, BAU M, 2021. Banded iron formation from Antarctica: The 2.5 Ga old Mt. Ruker BIF and the antiquity of lanthanide tetrad effect and super-chondritic Y/Ho ratio in seawater [J]. Gondwana Research, 91: 97-111.
- GOLYNSKY A V, ALYAVDIN S V, MASOLOV V N, et al., 2002. The composite magnetic anomaly map of the East Antarctic [J]. Tectonophysics, 347 (1-3): 109-120.
- GOLYNSKY A V, MASOLOV V N, VOLNUKHIN V S, et al., 2006.
 Crustal provinces of the Prince Charles Mountains region and surrounding areas in the light of aeromagnetic data [M] // FÜTTERER D K, DAMASKE D, KLEINSCHMIDT G, et al. Antarctica: Contributions to global earth sciences. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag: 83-94.
- HALPIN J A, CLARKE G L, WHITE R W, et al., 2007. Contrasting P-T-t paths for Neoproterozoic metamorphism in MacRobertson and Kemp Lands, east Antarctica [J]. Journal of Metamorphic Geology, 25 (6): 683-701.
- HALPIN J A, DACZKO N R, MILAN L A, et al., 2012. Decoding near concordant U-Pb zircon ages spanning several hundred million years: Recrystallisation, metamictisation or diffusion? [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 163 (1): 67-85.
- LIU Q, ZHANG W, CHENG W, et al., 2013. Developing model and

prospect of the deep iron deposits in Anshan-Benxi area, Liaoning province [J]. Geology and Resources, 22 (4): 304-307. (in Chinese with English abstract)

- LIU X C, 2009. Polymetamorphism of the Prydz Belt, East Antarctica: Implications for the reconstruction of the Rodinia and Gondwanasupercontinents [J]. Acta Petrologica Sinica, 25 (8): 1808-1818. (in Chinese with English abstract)
- MCLEAN M A, RAWLING T J, BETTS P G, et al., 2008. Threedimensional inversion modelling of a Neoproterozoic basin in the southern Prince Charles Mountains, East Antarctica [J]. Tectonophysics, 456 (3-4): 180-193.
- MIKHALSKY E V, SHERATON J W, LAIBA A A, et al., 1996. Geochemistry and origin of Mesoproterozoic metavolcanic rocks from Fisher Massif, Prince Charles Mountains, East Antarctica [J]. Antarctic Science, 8 (1): 85-104.
- MIKHALSKY E V, LAIBA A A, BELIATSKY B V, et al., 1999. Geology, age and origin of the Mount Willing area (Prince Charles Mountains, East Antarctica) [J]. Antarctic Science, 11 (3): 338-352.
- MIKHALSKY E V, SHERATON J W, LAIBA A A, et al., 2001. Geology of the Prince Charles Mountains, Antarctica [M]. AGSO-Geoscience Australia Bulletin, 247, Canberra, 1-209.
- MIKHALSKY E V, BELIATSKY B V, SHERATON J W, et al., 2006. Two distinct Precambrian terranes in the southern Prince Charles Mountains, East Antarctica: SHRIMP dating and geochemical constraints [J]. Gondwana Research, 9 (3): 291-309.
- MORRISSEY L J, HAND M, KELSEY D E, 2015. Multi-stage metamorphism in the Rayner-Eastern Ghats Terrane: P-T-t constraints from the northern Prince Charles Mountains, east Antarctica [J]. Precambrian Research, 267: 137-163.
- MORRISSEY L J, HAND M, KELSEY D E, et al., 2016. Cambrian high-temperature reworking of the Rayner-Eastern ghats terrane: Constraints from the Northern Prince Charles Mountains region, East Antarctica [J]. Journal of Petrology, 57 (1): 53-92.
- PHILLIPS G, WILSON C J L, FITZSIMONS I C W, 2005. Stratigraphy and structure of the southern Prince Charles Mountains, East Antarctica [J]. Terra Antartica, 12 (2): 69-86.
- PHILLIPS G, WILSON C J L, CAMPBELL I H, et al, 2006. U-Th-Pb detrital zircon geochronology from the southern Prince Charles Mountains, East Antarctica-defining the Archaean to Neoproterozoic Ruker Province [J]. Precambrian Research, 148 (3-4): 292-306.
- PHILLIPS G, WHITE R W, WILSON C J L, 2007. On the roles of deformation and fluid during rejuvenation of a polymetamorphic terrane: Inferences on the geodynamic evolution of the Ruker Province, East Antarctica [J]. Journal of Metamorphic Geology, 25 (8): 855-871.
- PHILLIPS G, KELSEY D E, CORVINO A F, et al., 2009. Continental reworking during overprinting orogenic events, Southern Prince Charles Mountains, East Antarctica [J]. Journal of Petrology, 50 (11): 2017-2041.
- RAVICH M G, FEDOROV L V, TARUTIN O A, 1982. Precambrian

iron deposits of the Prince Charles Mountains [M] //CRADDOCK C. Antarctic geoscience. Madison, WI: University of Wisconsin Press: 853-858.

- SOLOVIEV D S, KAMENEV E N, RAVICH G M, 1967. Geological activities in 1965/66 [J]. Inf. Byull. Sov. Antarki. Eksped., 62: 10-18.
- TINGEY R J, 1982. The geologic evolution of the Prince Charles Mountains—An Antarctic Archaean cratonicblock [M] // CRADDOCK C. Antarctic Geoscience. Madison, WI: University of Wisconsin Press: 455-464.
- TINGEY R J, 1990. Banded iron formations in East Antarctica [M] // SPLETTSTOESSER J F, DRESCHHOFF G A M. Mineral resources potential of Antarctica. Antarctic Research Series. American Geophysical Union, 51: 125-131.
- TINGEY R J, 1991. The regional geology of Archaean and Proterozoic rocks in Antarctica [M] //TINGEY R J. The Geology of Antarctica. Oxford: Oxford University Press: 1-73.
- WAN P Y, WANG G H, ZHOU Y, et al., 2020. A study on the prospecting potential of ultra-lean magnetite in Nanjiang area, Sichuan province [J]. China's Manganese Industry, 38 (4): 17-24. (in Chinese with English abstract)
- ZENG R Y, CHEN D W, HUANG J Y, et al., 2020. Application of high precision magnetic measurement in GPAFAYA iron deposit in North Province, Sierra Leone [J]. Mineral Exploration, 11 (8): 1744-1753. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG P, QIAO S Y, JIANG H Y, et al., 2012. Metallogenic regularities and resources potential of the iron deposits in ANSHAN-BENXI area, Liaoning province [J]. Geology and Resources, 21 (1): 134-138. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO L Q, WANG C N, ZHANG M, et al., 2020. Current exploration status and supply-demand situation of iron ore resources in China mainland [J]. Geology and Exploration, 56 (3): 635-643. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 边荣春,韩玉珍,王仕昌,等,2014.济宁市翟村铁矿小体重值与磁 性铁品位的回归分析 [J].山东国土资源,30 (5):57-58,64.
- 陈廷愚, 1996. 南极洲主要矿产资源 [J]. 地球学报:中国地质科 学院院报, 17 (1): 65-77.
- 刘群,张伟,成伟,等,2013. 辽宁鞍山-本溪地区深部铁矿发育模 式与铁矿远景 [J]. 地质与资源,22 (4): 304-307.
- 刘晓春,2009. 东南极普里兹带多期变质作用及其对罗迪尼亚和冈 瓦纳超大陆重建的启示 [J]. 岩石学报,25 (8):1808-1818.
- 万平益,王光洪,周勇,等,2020.四川省南江地区超贫磁铁矿找矿 潜力探讨 [J].中国锰业,38 (4):17-24.
- 曾瑞垠, 陈德稳, 黄建业, 等, 2020. 高精度磁测技术在塞拉利昂北 方省 GPAFAYA 铁矿勘查中的应用 [J]. 矿产勘查, 11 (8): 1744-1753.
- 张朋,乔树岩,姜海洋,等,2012. 辽宁鞍本地区铁矿成矿规律与资 源潜力分析 [J]. 地质与资源,21 (1):134-138.
- 赵立群,王春女,张敏,等,2020. 中国铁矿资源勘查开发现状及供 需形势分析 [J]. 地质与勘探,56 (3):635-643.