



低空高精度磁测方法在未知区找铁的应用 ——以柬埔寨罗文真穹隆为例

牛聪聪, 张雪亮, 赵俊宏, 宁庚陈, 张志庆

中国有色桂林矿产地质研究院有限公司, 广西 桂林 541004

摘 要: 罗文真穹隆构造区属柬埔寨北部暹粒-上丁成矿带, 主要矿种为铁. 已发现铁矿床主要有表生残坡积矿和原生矿两种形式, 矿体呈层状、似层状、囊状、透镜状, 矿物组合为赤铁矿-磁铁矿-褐铁矿. 已发现主要铁矿床有格高铁矿、石山铁矿、诺东山铁矿. 穹隆内大范围未知区与已知矿床具有类似的成矿地质背景. 为快速评价未知区内铁成矿背景, 利用动力三角翼低空高精度磁测技术, 综合地质-遥感信息进行找矿预测, 并结合地面磁测进行验证. 共圈定 12 个找矿预测区, 其中 4 个为一级找矿靶区, 为下一步的主要工作方向.

关键词: 铁矿; 低空磁测; 找矿预测; 穹隆构造; 柬埔寨

APPLICATION OF LOW-ALTITUDE HIGH-PRECISION MAGNETIC SURVEY FOR IRON DEPOSITS IN UNPROVEN AREAS: A Case Study of Rovieng Cheung Dome in Cambodia

NIU Cong-cong, ZHANG Xue-liang, ZHAO Jun-hong, NING Geng-chen, ZHANG Zhi-qing

Guilin Mineral and Geological Institute of China Nonferrous Metals Mining (Group) Co., Ltd., Guilin 541004, Guangxi Autonomous Region, China

Abstract: The Rovieng Cheung dome structure is located in the Siem Reap-Stung Treng metallogenic belt with the main mineral of iron in northern Cambodia. The discovered iron deposits, including Gygoe iron deposit, Rock Mountain iron deposit and Nuodongan iron deposit, mainly consist of supergene residual deluvial ores and primary ores, with orebodies occurred in layered, stratoid, cystic and lenticular forms, and mineral assemblages of hematite-magnetite-limonite. The deposits in large unproven areas within the dome share similar metallogenic geological setting with the known deposits. To rapidly evaluate the iron metallogenic background in the unproven areas, the low-altitude high-precision magnetic survey by trike is conducted on the basis of geological and remote sensing information, combined with the ground magnetic survey for verification. A total of 12 prediction areas are delineated, among which 4 are first-level prospecting targets as the main direction of next step.

Key words: iron deposit; low altitude magnetic survey; prospecting prediction; dome structure; Cambodia

0 引言

物探方法(尤其是磁法)找铁已经是比较成熟的一

门技术. 在辽宁鞍山及查马屯铁矿、四川轱辘及攀枝花铁矿、内蒙古黄岗梁铁矿、福建马坑铁矿、安徽宁芜

收稿日期: 2021-03-10; 修回日期: 2021-06-11. 编辑: 张哲.

基金项目: 国土资源部国外矿产资源风险勘查专项“柬埔寨罗文真铁矿普查”(编号 10220B001).

作者简介: 牛聪聪(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事矿物学、矿床学研究工作, 通信地址 广西壮族自治区桂林市七星区辅星路 2 号, E-mail//443519023@qq.com

铁矿、湖北大冶铁矿等矿床,无论在矿床地质研究还是找矿预测方面,均开展过较为系统的磁法工作^[1-10].

随着“一带一路”合作倡议的提出,对国外矿山的研究也越来越深入.柬埔寨罗文真地区属于上丁省-百威夏-暹粒成矿区.在找矿方法上,肖振宙^[11]利用低空航磁结合化探原生晕、叠加晕的方法在百威夏棕榈山金矿空白区取得了较好的找矿效果;牛聪聪等^[12-13]针对罗文真穹隆广大地区,提出了“地质+遥感+物探低空+物探地面磁测、激电+地质调查找铁矿”的方法集成.在成矿研究上,邱成贵^[14]对罗文邦德铜矿的研究认为铜矿体赋存在闪长玢岩中,经后期岩浆热液的上升、充填交代形成脉状矿体;戴开明^[15]对百威夏龙山金矿的研究认为矿床定位于中酸性火山弧成矿亚带,矿体呈脉状产于花岗(闪长)岩体中,并根据矿物组合特点划分了3个成矿阶段;黄敦杰等^[16]在对百威夏罗文铁矿的研究中认为成矿受火山口、火山颈控制,属火山-次火山岩型铁矿.

我国低空磁法运用在铁矿勘查已较为成熟^[17-21],

而柬埔寨基础地质工作程度较低,加上森林覆盖、第四系发育,矿产勘查难以做到快速评价,因此高精度的磁法测量成为主要的填图和找矿手段.本研究依托国外风险勘查基金项目,运用动力三角翼低空磁测技术,对罗文真穹隆内大范围铁矿进行快速评价,取得了较好的找矿效果.

1 区域地质背景

罗文真地区处于南海-印支地块中部,中三叠世印支运动使岩层发生变形,伴随岩浆的底劈作用,在柬埔寨北部形成了一条轴向近东西叠加北西向的穹隆褶皱构造带^[12].穹隆呈近东西向近椭圆状分布,长约200 km,宽约50 km(图1).区域内泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系广泛发育,其中上石炭统一二叠系地层为罗文真地区铁矿的主要赋矿层位.该套地层岩性以沉积相砂岩、灰岩和喷出相安山岩为主.区内岩浆活动频繁,富含铁质的印支-燕山期侵入的中酸性岩浆或直接分异成矿,或在与富钙质围岩的接触带交代成矿^[16].

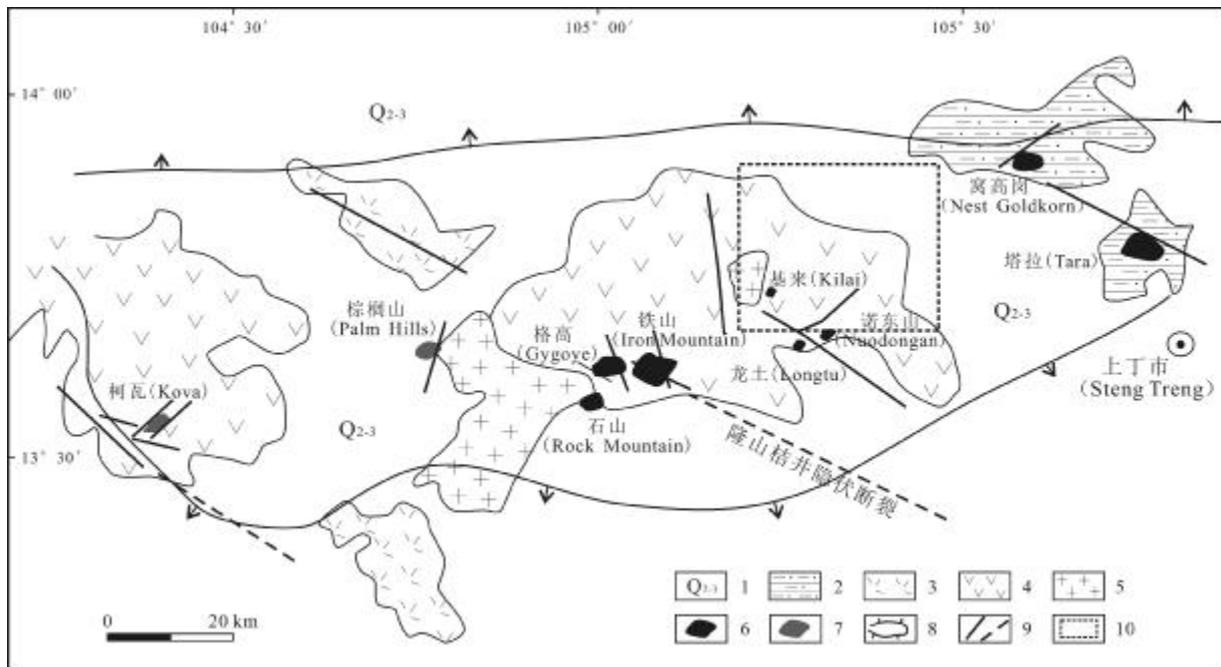


图1 罗文真穹隆地区地质构造简图

(据文献^[12]修改)

Fig. 1 Geological structure sketch map of Rovieng Cheung dome area

(Modified from Reference^[12])

- 1—第四系砂砾岩(Quaternary glutenite); 2—泥盆系砂页岩(Devonian sandy shale); 3—三叠纪流纹岩(Triassic rhyolite); 4—晚石炭世-二叠纪安山岩(Late Carboniferous-Permian andesite); 5—燕山期花岗岩(Yanshanian granite); 6—铁矿床(iron deposit); 7—铜金矿床(copper-gold deposit); 8—穹隆构造范围(range of dome structure); 9—断层及隐伏断层(fault and concealed fault); 10—低空磁测区(low altitude magnetic survey area)

从元古宙到新生代,本区经历了数次大地构造运动及岩浆侵入活动,使得该区构造极为复杂。在漫长的地质历史时期,地质作用为成矿物质的聚集及矿床的形成创造了极为有利的条件,其中印支期及燕山期是研究区最重要的两个成矿时期。主要的矿种有铁、铜、铅、锌、钨、钼、锡、金。罗文真穹隆地区发现的铁矿有格高(Gygoye)矿床、铁山(Iron Mountain)矿床、石山(Rock Mountain)矿床、龙土(Longtu)矿床、诺东山(Nuodongan)矿床、基来(Kilai)矿床、窝高岗(Nest Goldkorn)矿床、塔拉(Tara)矿床;铜金矿有柯瓦(Kova)矿床、棕榈山(Palm Hills)矿床。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地质

罗文真穹隆地区出露地层主要为上石炭统一二叠系(C₃—P)杂砂岩、含砾粉砂质泥岩、灰岩、安山岩和第四系(Q)铁质胶结砂砾岩、有机浮土沉积物。因土层大面积覆盖,且厚度较大,构造行迹多被掩埋,在地表难以发现,矿区内构造多由钻孔岩心破碎带特征进行推测。区内侵入岩活动非常强烈,其中最主要的是印支晚期和燕山期岩浆侵入活动。各矿区地质特征见表 1。

2.2 矿石结构构造

矿区内铁矿石主要为粒状结构、半自形粒状结构、他形粒状结构、他形束状结构、斑状结构、鳞片变晶结构,集合体多呈团斑状、脉状、针状、扫把状、束状。原生构造主要为致密块状、稠密浸染状、稀疏浸染状、角

砾状及条带浸染状。矿体地表露头主要受到强烈的机械风化,局部伴有一定程度的化学风化,呈碎块状、颗粒状及蜂窝状。

2.3 围岩蚀变

区内围岩蚀变类型比较多,最普遍的为绿泥石化、硅化、碳酸盐化和黄铁矿化,其他蚀变为绿帘石化、膏岩化、绢云母化、石榴子石化。与成矿关系密切的为黄铁矿化、绿泥石化、绿帘石化和石榴石化。

3 高精度磁测应用

研究区范围面积大,约为 200 km²,大多为原始森林覆盖,常规地面勘查方法效率低。本次研究采用动力三角翼滑翔机为低空磁测载体,按照 1:1 万比例尺进行磁测扫面,以期达到快速评价的目的。

3.1 磁性参数特征

研究区内共采集物性测试标本 65 块,磁参数测定仪器为质子磁力仪。岩、矿石磁性特征见表 2。

从表 2 可以看出,区内磁铁矿体的磁化率与围岩有明显的差异,赤铁矿磁性较弱,比磁铁矿低一个数量级,表层普遍分布的铁质砾岩具弱磁性,侵入岩类(闪长岩、花岗岩、闪长玢岩)具有弱磁性。磁测圈定的异常高值区可以作为靶区圈定的直接标志。

3.2 有效性评价

选取罗文真地区已发现的格高铁矿床作为低空磁测有效评价区,并与工程揭露矿体情况进行对照(图 2)。

表 1 罗文真穹隆地区各铁矿区地质特征表

Table 1 Geological characteristics of iron orefields in Rovieng Cheung dome area

矿区	地层	构造	侵入岩	矿化特征
格高	石炭系—二叠系杂砂岩、含砾粉砂质泥岩、灰岩	总体构造线走向 NW 向,另有 NE 向断裂错段 NW 向	闪长玢岩、闪长岩、花岗闪长岩	发育表生残坡积矿和原生矿,以原生磁铁矿为主;矿体呈层状、似层状、囊状、透镜状分布,主要位于侵入岩体与上石炭统一二叠系地层的接触带上;矿物组合为赤铁矿—磁铁矿—褐铁矿;蚀变和矿化从岩体—矿体—围岩均具有分带性
石山	石炭系—二叠系杂砂岩、安山岩	总体构造线走向 NW 向,NE 向次之	闪长玢岩、闪长岩、花岗闪长岩	发育表生残坡积矿和原生矿,以表生残坡积矿为主;矿体以露头为中心呈面状分布,与地貌关系密切,呈平卧状、囊状、透镜体状;矿体露头从中心向外为块状磁铁矿(少量赤铁矿、褐铁矿)→小块状夹颗粒状磁铁矿(大量褐铁矿化)→细粒状及颗粒状磁铁矿
诺东山	石炭系—二叠系凝灰岩、安山岩	区内断裂依据走向及先后切割关系分为三组: NW 向最早,其次为 NE 向,EW 向最晚	闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩	见少量残坡积型铁矿化露头;矿体呈透镜体状、囊状
基来	石炭系—二叠系安山岩、千枚岩	总体构造线走向 NW 向,NE 向次之	闪长岩、花岗闪长岩	见少量残坡积型铁矿化露头;矿体呈透镜体状、囊状

表 2 罗文真地区岩、矿石磁性参数表

Table 2 Magnetic parameters of rocks and ores

岩石名称	标本数			K/10 ⁻⁶ SI		
	总数	无磁性	有磁性	极大值	极小值	平均值
砾岩(铁质胶结)	7	5	2	32	0	17
砾岩(泥质胶结)	5	5	0	0	0	0
安山岩	3	3	0	0	0	0
安山玢岩	3	3	0	0	0	0
石英岩	3	3	0	0	0	0
灰岩	2	2	0	0	0	0
闪长玢岩	5	0	5	55	30	50
砂岩	3	3	0	0	0	0
花岗(斑)岩	7	3	4	33	0	25
闪长岩	6	2	4	56	0	41
磁铁矿	15	0	15	8756	6521	7789
赤铁矿	6	0	6	1356	165	549

(1)异常解释

磁测结果显示,地面磁测显示是以负异常为主、正负伴生的复杂变化异常区,异常强度高,梯度大,ΔT 曲线跳跃,场值一般在-20 411~+7 882 nT 之间. 出现负磁异常的原因是,在斜磁化背景下,很多异常中心都会与磁性体发生偏离的现象,在磁测勘探理论上, $Z_a \sin I + H_a \cos I \cos A = \Delta T$ 为测线垂直走向的二度体 ΔT 异常的主要计算方式^[22].

从公式特点来看,I、A 代表磁性角,只有在磁性角为 0°和 90°时,在磁性体的正上方存在着 ΔT 异常中心. ΔT 异常在中高纬度地区的垂直分量构成部分主要为 Z_a,反映了正异常为 ΔT 的主要异常情况. 这种异常形态的解释,经常在中高纬度地区使用. 在低纬度地区,水平磁化为低纬度区域磁性体的主要磁化环境,ΔT 异常在低纬度区域水平分量 H_a 构成了 ΔT 的主要

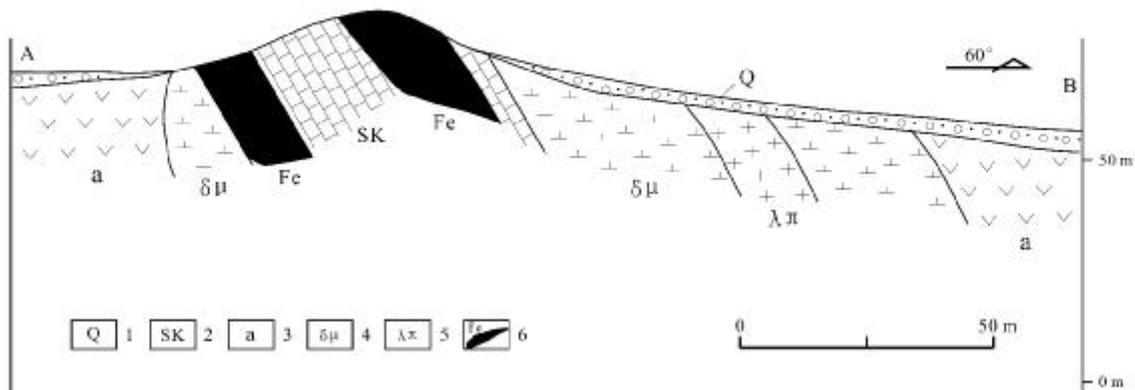
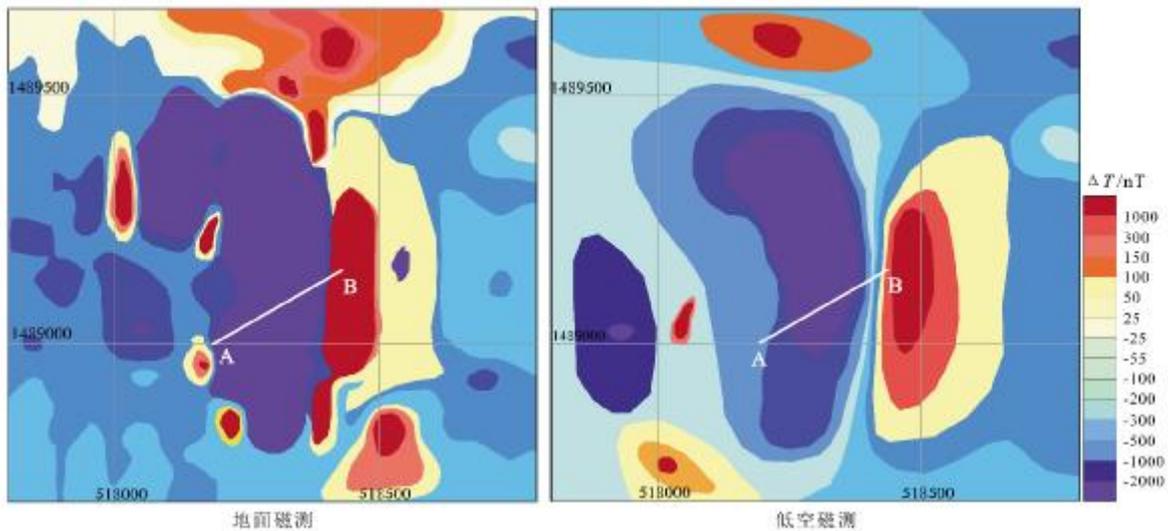


图 2 格高铁矿地面与低空磁测等值线图对比

Fig. 2 Comparison of contour map between ground and low-altitude magnetic surveys of Gygoye iron deposit

1—第四系砂砾层(Quaternary sandy gravel); 2—二叠系夕卡岩(Permian skarn); 3—二叠纪安山岩(Permian andesite); 4—闪长玢岩(diorite porphyry); 5—花岗斑岩(granite porphyry); 6—磁铁矿体(magnetite orebody)

异常. 所以, 负异常为低纬度区域 ΔT 的主要异常特征, 伴生异常为正异常, 且一般在负异常的极值区域中会存在矿体. 由于工作区地处低纬度地区, 观测所得的磁场形态以负异常为主, 伴生多个正异常, 这种以负异常为矿体中心的结果也与前人在柬埔寨菩萨省布蔑地区、Oyadao 地区磁测结果一致^[23-24].

(2) 异常对比

低空磁测显示与地面磁测异常基本一致. 通过钻探工程发现铁矿体 2 个, 与异常较为吻合, 确定磁异常为矿致异常. 物探高磁测量对本区磁铁矿的反映是有效的, 低空高精度磁测方法在本区异常反映良好, 基本可以代替地面磁测加以运用.

3.3 找矿预测

根据磁异常分布结合地质和遥感解译构造, 初步圈定了 12 个找矿预测区, 其中 4 个为一级找矿靶区 (编号为 A-1、A-2、A-3、A-4), 8 个二级靶区, 并对一级找矿靶区开展了地面高精度磁测 (图 3). 综合分析异常特点后开展了少量槽探工程验证, 其磁异常及地质验证情况见表 3.

4 结论

(1) 罗文真穹隆地区铁矿与围岩磁性差异明显, 动力三角翼低空磁测系统与地表磁测相比具有抗干扰、效率高的特点, 尤其是在大范围森林覆盖或沼泽区域找铁, 具有明显优势.

(2) 低空高精度磁测方法在罗文真研究区内找铁取得了良好的效果, 共圈定找矿预测区 12 个, 其中一

级靶区 4 个, 地表槽探工程验证为矿致异常, 为下一步工作的重点方向.

参考文献 (References):

- [1] 刘群, 张伟, 成伟, 等. 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, 2013, 22(4): 304-307.
Liu Q, Zhang W, Cheng W, et al. Developing model and prospect of the deep iron deposits in Anshan-Benxi area, Liaoning Province[J]. Geology and Resources, 2013, 22(4): 304-307.
- [2] 隋真龙, 张琦, 冯啸宇, 等. 辽宁宽甸县爱林铁矿地质特征及控矿因素分析[J]. 地质与资源, 2020, 29(2): 120-125.
Sui Z L, Zhang Q, Feng X Y, et al. Analysis on the geology and ore-controlling factors of Ailin iron deposit in Liaoning Province [J]. Geology and Resources, 2020, 29(2): 120-125.
- [3] 武国忠, 肖光铭, 杨大欢. 广东省铁矿成矿规律研究[J]. 地质与资源, 2019, 28(3): 272-279.
Wu G Z, Xiao G M, Yang D H. Study on the metallogenic regularity of iron deposits in Guangdong Province [J]. Geology and Resources, 2019, 28(3): 272-279.
- [4] 乔春贵, 周坚鑫, 刘伟, 等. 新疆塔什库尔干地区铁矿航磁异常特征及找矿潜力[J]. 物探与化探, 2012, 36(3): 350-355.
Qiao C G, Zhou J X, Liu W, et al. Areamagnetic characteristics of iron ore deposits and ore-prospecting potential in Taxkorgan area of Xinjiang [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(3): 350-355.
- [5] 白银增, 赵涌涛, 王泽蛟, 等. 辽宁查马屯铁矿三维地质建模及深部预测[J]. 地质与资源, 2019, 28(4): 321-325.
Bai Y Z, Zhao Y T, Wang Z J, et al. 3D geological modeling and deep prospecting prediction in Chamatun iron deposit, Liaoning Province [J]. Geology and Resources, 2019, 28(4): 321-325.
- [6] 任雨, 朱谷昌, 张建国, 等. 遥感图像三维可视化在低空磁测飞行

表 3 靶区磁异常特征及地质验证情况

Table 3 Characteristics of magnetic anomaly and geological verification in target areas

预测靶区	磁异常描述	地质验证情况
A-1	异常范围 1200 m × 1800 m, 正负异常对称展布, 正异常最高值 > 3000 nT, 负异常最低值 < -2000 nT; 梯度较大, ΔT 曲线跳跃较大; 推测磁性体总体走向为 65°, 倾向 SE	断裂构造带从异常东边穿过, 经槽探工程验证异常为磁铁矿体引起; 磁铁矿脉厚度 2.8 m, 走向 60°, TFe 平均品位 32%; 地表见少量磁铁矿露头, 矿体位于在负异常一侧; 推测异常中心和深部存在原生磁铁矿体, 可作为下一步钻探施工主要区域
A-2	异常范围 800 m × 1200 m, 正负异常相互伴生, 正异常最高值 > 1000 nT, 负异常最低值 < -2000 nT; 梯度变化较缓; 推测磁性体走向 E-W, 倾向 SE	断裂构造带从异常中心穿过, 经槽探工程验证异常为磁铁矿体引起; 矿脉厚度 1.5 m, TFe 品位 38%, 在深部具有良好的找矿前景; 围岩以硅化安山岩为主, 矿石呈角砾状、细脉状; 推测本区的磁异常主要与断裂有关
A-3	异常范围 800 m × 1300 m, 负异常, 分为南北两块, 呈近长条状展布, 负异常最低值 < -3000 nT; ΔT 曲线跳跃较大; 推测磁性体近直立, 总体走向为 70°	为闪长玢岩与上覆安山岩的接触带, 由于工作程度较低, 仅在地表见数块铁矿转石, 没有开展相应的钻探和槽探工程; 推断为铁矿体导致的异常
A-4	异常范围 1000 m × 1300 m, 负异常, 最低值 < -3000 nT; 呈串珠状展布, 磁异常未封闭; 推测磁性体走向为 80°, 倾向 SE	异常区域发育有灰岩、大理岩; 推测主要为侵入闪长岩引起的异常, 异常中心和深部可能存在夕卡岩型磁铁矿体

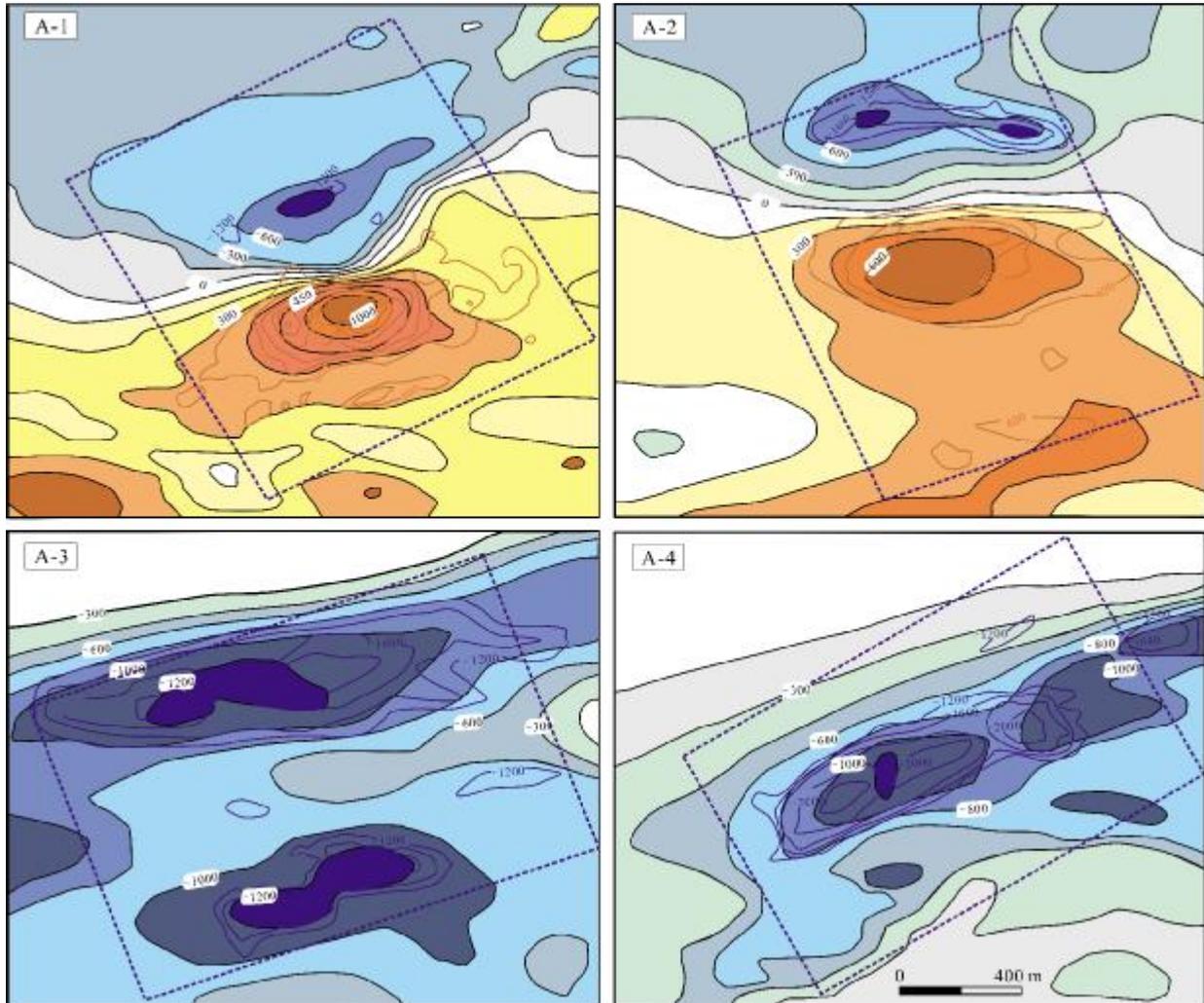


图3 罗文真穹隆预测靶区磁异常叠合图

Fig. 3 Superimposed map of magnetic anomaly in the predicted target of Rovieng Cheung dome area

底图为低空磁测异常图,蓝色框内为地面磁测区域(base map for the low-altitude magnetic anomaly, and blue box the ground magnetic survey area)

辅助设计中的应用[J]. 遥感信息, 2014, 29(3): 78-81.

Ren Y, Zhu G C, Zhang J G, et al. Remote sensing image visualization for low-altitude magnetic survey flight aided design[J]. Remote Sensing Information, 2014, 29(3): 78-81.

[7]张亚东, 龚红蕾, 刘俊长, 等. 依据航磁异常寻找中关铁矿的效果[J]. 物探与化探, 2014, 38(4): 629-634.

Zhang Y D, Gong H L, Liu J C, et al. The ore-prospecting effect of aeromagnetic anomalies in the Zhongguan iron deposit, Hebei Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(4): 629-634.

[8]董杰, 李卫东, 肖金平, 等. 河北省八道河航磁低背景场区铁矿地面磁测勘查实例[J]. 物探与化探, 2010, 34(5): 557-563.

Dong J, Li W D, Xiao J P, et al. Ground iron ore magnetic survey in the Badaohe aeromagnetic low background area of Hebei Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(5): 557-563.

[9]高飞. 运用定量解释方法剖析磁异常——以大板金矿区 C₆ 磁异常为例[J]. 地质与资源, 2004, 13(1): 43-46.

Gao F. The application of quantitative interpretation in magnetic anomaly analysis: A case study of the C₆ magnetic anomaly in Daban gold field[J]. Geology and Resources, 2004, 13(1): 43-46.

[10]李世超, 路来君, 刘光胜, 等. 基于航磁解译构造法的哀牢山地区金多金属远景预测[J]. 中国地质, 2009, 36(3): 728-735.

Li S C, Lu L J, Liu G S, et al. Perspective prognosis of gold-polymetallic ore deposits in Ailao Mountain areabased on aeromagnetic structural interpretation[J]. Geology in China, 2009, 36(3): 728-735.

[11]肖振宙. 柬埔寨柏威夏省棕榈山矿区金矿找矿前景分析[J]. 黄金, 2013, 34(7): 19-21.

Xiao Z Z. Analysis on prospecting direction of Zonglushan gold deposit in Preah Vihear, Cambodia[J]. Gold, 2013, 34(7): 19-21.

- [12]牛聪聪,张雪亮,赵俊宏,等.柬埔寨罗文真地区铁矿成矿规律及找矿方法集成[J].地质论评,2016,62(S1):173-174.
Niu C C, Zhang X L, Zhao J H, et al. Metallogenic regularity and prospecting methods of Luowenzhen vault iron deposit of Cambodia [J]. Geological Review, 2016, 62(S1): 173-174.
- [13]张雪亮,牛聪聪,赵俊宏,等.柬埔寨KW铜金矿床地质特征及控矿条件[J].矿产与地质,2014,28(2):191-195.
Zhang X L, Niu C C, Zhao J H, et al. Geological characteristics and ore controlling conditions of KW copper-gold deposit in Cambodia [J]. Mineral Resources and Geology, 2014, 28(2): 191-195.
- [14]邱成贵.柬埔寨柏威夏省文德邦铜矿地质特征及找矿标志[J].山东国土资源,2017,33(6):18-22.
Qiu C G. Geological characteristics and prospecting signs of copper deposit in Roman Tam County of Preah Vihear Province in Cambodia [J]. Shandong Land and Resources, 2017, 33(6): 18-22.
- [15]戴开明.柬埔寨柏威夏省龙山金矿地质特征及其成矿分析[J].中国矿业,2017,26(7):151-154.
Dai K M. Analysis of Longshan gold mine geological characteristic and its origin in Preah-Vihear, the Kingdom of Cambodia [J]. China Mining Magazine, 2017, 26(7): 151-154.
- [16]黄敦杰,彭振安,刘元春,等.柬埔寨柏威夏省罗文铁矿床地质特征及成因浅析[J].西北地质,2014,47(1):197-207.
Huang D J, Peng Z A, Liu Y C, et al. Geological characteristics and genesis of Luowen iron deposit in Preah Vihear of Cambodia [J]. Northwestern Geology, 2014, 47(1): 197-207.
- [17]黄为俊,张楠,贾嵩,等.动力三角翼低空磁测在多宝山地区的应用效果[J].世界地质,2017,36(1):241-245.
Huang W J, Zhang N, Jia S, et al. Application effect of magnetic survey with dynamic delta wing at low altitude in Duobaoshan area [J]. Global Geology, 2017, 36(1): 241-245.
- [18]王庆乙,行英弟,蒋彬,等.MAMSS-1超低空高精度航磁系统的研制[J].物探与化探,2010,34(6):712-716.
Wang Q Y, Xing Y D, Jiang B, et al. The design and development of the MAMSS-1 type minimum altitude high-precision aeromagnetic system [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(6): 712-716.
- [19]张楠,贾嵩,蒋彬,等.高精度低空磁测在火山岩构造区的应用[J].矿产勘查,2017,8(5):881-888.
Zhang N, Jia S, Jiang B, et al. Application of high-accuracy and low-altitude aeromagnetic survey in the volcanic tectonic area [J]. Mineral Exploration, 2017, 8(5): 881-888.
- [20]张津伟,武力聪,杨春,等.几种低空高精度航空磁测系统及找矿应用分析[J].矿产与地质,2014,28(1):124-128.
Zhang J W, Wu L C, Yang C, et al. Several high resolution aeromagnetic systems surveyed at very low altitude and mine prospecting application analysis [J]. Mineral Resources and Geology, 2014, 28(1): 124-128.
- [21]江志强,王建飞.航磁梯度数据解释新方法在迁安铁矿勘探中的应用[J].世界地质,2017,36(3):947-953,963.
Jiang Z Q, Wang J F. New interpretation methods of aeromagnetic gradient data in application of iron mine exploration of Qianan area [J]. Global Geology, 2017, 36(3): 947-953, 963.
- [22]高小光,张勇.低纬度地区磁法勘探工作体会[J].资源环境与工程,2011,25(3):269-271.
Gao X G, Zhang Y. Work experience of magnetic prospecting in low latitude region [J]. Resources Environment & Engineering, 2011, 25(3): 269-271.
- [23]曹军,敬荣中,赵毅,等.带约束的化极在低纬度、高剩磁地区的应用——以柬埔寨Oyadao金矿为例[J].矿产与地质,2018,32(2):334-339.
Cao J, Jing R Z, Zhao Y, et al. Application of constrained pole change in low latitude and high residual geomagnetic field area: Results from field application to Oyadao gold deposit, Cambodia [J]. Mineral Resources and Geology, 2018, 32(2): 334-339.
- [24]胡庆辉.低纬度地区磁异常化极技术在铬铁矿勘查中应用——以柬埔寨王国菩萨省布蔑地区为例[J].矿产勘查,2019,10(7):1679-1686.
Hu Q H. The application of reduction to the pole of magnetic anomalies at low latitude in Chromite deposit survey: The case of Puokmea area, Pursat Province of Cambodia [J]. Mineral Exploration, 2019, 10(7): 1679-1686.