

文章编号: 0258-7106(2008)04-0494-08

内蒙古羊蹄子山-磨石山钛矿床的物性特征 及有效找矿方法探讨*

严加永^{1,2}, 刘光海¹, 王君恒³, 潘竹平³

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;
3 中国地质大学, 北京 100083)

摘要 内蒙古羊蹄子山-磨石山钛矿床是近几年国内所发现的新型钛矿床, 其中, 羊蹄子山矿带为热液改造型富钛矿床, 磨石山矿带为沉积变质型富钛矿床。这2个矿带的主要有用矿物为锐钛矿、金红石及钛铁矿。根据大量物性测量和研究对比, 发现富钛矿石具有较高的密度、弱磁性、高极化率、较低电阻率的物性特征。通过重、磁探测发现了多处有意义的异常, 对部分异常进行了钻探验证, 结果表明, 高精度重力测量是有效的找矿方法, 高精度磁法为基本的找矿方法。文章结合该区岩(矿)石的物性特征, 探讨了大功率激电和频率域电磁法寻找此类矿床的有效性和可行性。并据此指出, 重力与磁法面积测量相结合, 在重点地段进行激电与电磁测深, 是寻找同类矿床的有效物探技术方法组合。

关键词 地球物理学, 钛矿床, 物性, 高精度重力和高精度磁法, 羊蹄子山-磨石山

中图分类号: P618.47; P631

文献标志码: A

A discussion on physical properties and effective exploration methods in Yantizishan-Moshishan titanium deposit

YAN JiaYong^{1,2}, LIU GuangHai¹, WANG JunHeng³ and PAN ZhuPing³

(1 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, China; 2 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3 China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract

The Yangtizishan-Moshishan titanium deposit is a new type titanium deposit found in recent years. The Yantizishan ore belt is a hydrothermally-altered rich titanium deposit, whereas the Moshishan ore belt is a metamorphosed sedimentary type rich titanium deposit. Main useful minerals in these two ore belts include anatase, rutile and ilmenite. According to physical properties and contrast studies, the authors have found that titanium ores are characterized by high density, weak magnetism, high polarization and low resistivity. It is held that the high precision gravity exploration is an effective method and the high precision magnetic exploration is a basic method, as is evidenced by results of gravity and magnetic exploration and drill verification. The effectiveness and feasibility of large power IP (Induced Polarization method) and frequency electromagnetism methods are discussed according to physical properties of rocks and ores. It is also pointed out that the effective combinations of geophysical methods are the utilization of gravity method, magnetic method and IP method to conduct area measurement and the employment of IP and electromagnetic sounding in key segments.

Key words: geophysics, titanium deposit, physical properties, high precision gravity and high precision magnetic method, Yangtizishan-Moshishan

* 本文得到内蒙古自治区地质勘查项目(05-1-TK01)及中央级公益性科研院所业务费专项资金(K2007-4-3)的共同资助
第一作者简介 严加永,男,1977年生,助理研究员,在读博士,从事深部地球物理及综合找矿方法研究。E-mail: yanjy@163.com
收稿日期 2008-05-15; 改回日期 2008-06-12。许德焕编辑。

羊蹄子山-磨石山钛矿床位于内蒙古正蓝旗西约 25 km 处。前人(潘启宇等,1999)认为,该矿床是产于下元古界二道凹群中的沉积变质铁矿床,铁的品位较低。经赵一鸣等(2006,2008)研究确认,这是一个以锐钛矿、钛铁矿和金红石为主的富钛矿床,初步查明具大-中型规模,是近几年国内所发现的规模较大的新型钛矿床(吴贤等,2006)。以前,该地区除航空物探外,其他物化探工作做得很少。为进一步查明这一新型矿床的规模并指导找矿,2005~2007年,笔者在该矿区进行了高精度磁法面积测量和重力剖面测量,同时完成了大量的岩(矿)石物性测定。根据重、磁探测资料,并结合矿区地质、物性特征,笔者提出了钻孔验证意见,取得了很好的找矿效果。异常查证结果表明,高精度磁法是找矿的基本的物探手

段,高精度重力测量是有效的找矿方法,并初步总结了寻找这一新类型钛矿床的物探综合找矿模式。

1 矿区地质特征及成矿背景

羊蹄子山-磨石山钛矿床在大地构造上属于华北地台北缘内蒙地轴中东段中生代火山岩盆地的局部隆起区。矿体呈似层状、透镜状产于中元古代原二道凹群变质岩系((1751±8)Ma)(李大新等,2008)中。赋矿围岩为绢云石英片岩、石英绢云片岩、变质石英(粉砂)岩、斜长角闪岩和角闪岩,矿体与围岩呈整合接触关系。矿区内有 2 个含矿层位,即南部的羊蹄子山矿带和北部的磨石山矿带,两地相距约 2 km(图 1)。前者产于二道凹群第 2 岩性组,后者则产于第 5 岩性组。在矿区内,可划

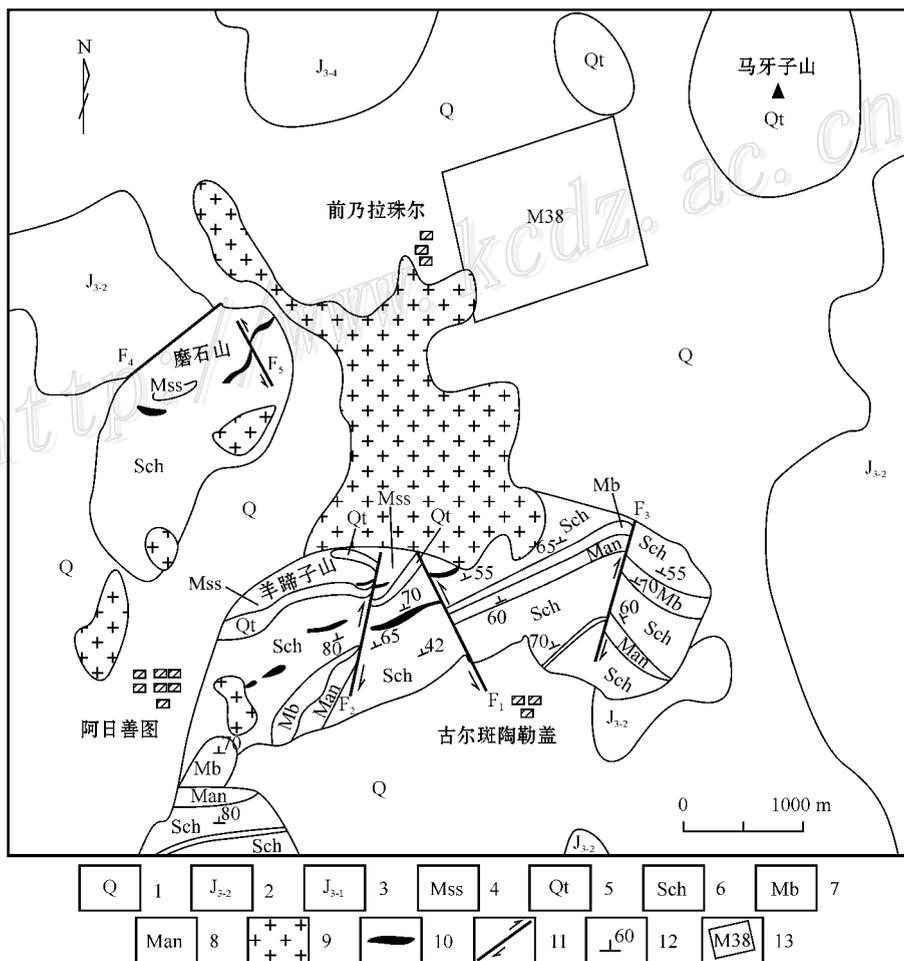


图 1 内蒙古羊蹄子山-磨石山钛矿床地质简图(据赵一鸣等,2006)

1—第四系;2—火山岩;3—片状凝灰岩;4—变质粉砂岩;5—石英岩;6—片岩;7—大理岩;8—斜长角闪岩;9—花岗岩;10—矿体;11—断层;12—产状;13—航磁异常

Fig. 1 Geological sketch map of Yantizishan-Moshishan titanium deposit, Inner Mongolia(after Zhao et al., 2006)
 1—Quaternary; 2—Volcanic rocks; 3—Schistose tuff; 4—Meta-siltstone; 5—Quartzite; 6—Schist; 7—Marble; 8—Plagioclase amphibolite schist; 9—Granite; 10—Ore body; 11—Faults; 12—Attitude; 13—Aeromagnetic anomaly

分出2个主要矿层,即羊蹄子山锐钛矿矿层及磨石山锐钛矿矿层(赵一鸣等,2006,2008)。

磨石山矿带由东、西2个矿体组成,以东部矿体为主。东部矿体呈似层状、层状,走向NEE,倾向N,倾角 $50\sim 60^\circ$,长逾400 m,厚5 m左右;西部矿体长约170 m,厚4~5 m,矿石品位相对较低。该矿带是以锐钛矿、金红石、钛铁矿为主的富钛矿带。按规范,金红石、锐钛矿原生矿的 TiO_2 工业品位为1.5%,边界品位为1%。磨石山富矿体的 TiO_2 含量可达5.0%~15.46%,平均7.64%(赵一鸣等,2006)。

羊蹄子山矿带由6个矿体组成。矿体呈透镜状,走向NEE,断续延长约1.8 km,单个矿体长100~600 m,厚3~10 m。大多数矿体倾向NNW,倾角 $55\sim 85^\circ$,个别矿体向S陡倾。该矿带为锐钛矿-金红石-钛铁矿-赤铁矿-褐铁矿共生;矿体的 TiO_2 含量可达3.85%~10.2%,平均5.81%,矿床规模达中-小型。

2 岩(矿)石物性特征

物性研究是进行地球物理找矿勘探的前提,物性参数对物探异常解释有着重要意义(刘光海,1994)。本次研究对所采集的大量岩(矿)石标本进行了物性测定,测试参数为密度、磁性和电性,测定结果见表1。为便于对比分析,将岩(矿)石标本分为2类进行统计:第1类为钛矿石,鉴于该矿区有经济价值的矿石,其矿石矿物主要为锐钛矿、钛铁矿和金红石,故将三者归为钛矿石进行物性统计;第2类为围岩,主要包括大理岩、变质砂岩、石英岩、石灰岩、片岩、火山岩和花岗岩等。

据表1,该矿区岩(矿)石的物性具以下特征:

(1) 钛矿石具有较高的密度,最高可达 3.92 kg/m^3 ,平均为 2.97 kg/m^3 ,与围岩的密度差达 $0.2\sim 0.9\text{ kg/m}^3$ 。此外,钛矿石的密度与 TiO_2 含量、($Fe_2O_3 + FeO$)含量之间大致呈正相关关系(图2),说明钛矿石的密度不仅与 TiO_2 的含量有关,而且也与矿石中含铁矿物的多少直接相关,因此,矿石中钛、铁矿物的含量是重要的找矿标志。矿石与围岩之间存在如此高的密度差,且密度差与钛、铁的含量成正比,因而,只要矿体具有一定品位和规模,便可在地面引起明显的重力异常。钛、铁的品位越高,密度差越大,观测到的重力异常也就越高,采用高精度重力测量完全可以将围岩与钛矿体区分开(董英君,2005),因此,高精度重力测量可用作主要的物探找矿方法。

(2) 锐钛矿、金红石和钛铁矿均属弱磁性矿物(刘光海等,2000)。对采自该矿区的岩(矿)石标本进行了磁性测定。钛矿石的磁化率平均为 $48.45 \times 10^{-6}\text{ SI}$,剩余磁化强度平均为 $4\ 122 \times 10^{-3}\text{ A/m}$;围岩的磁化率平均为 $33.26 \times 10^{-6}\text{ SI}$,剩余磁化强度平均为 $44\ 770 \times 10^{-3}\text{ A/m}$ 。围岩与钛矿石均为弱磁性。虽然钛矿石与围岩的磁性相差不大,但围岩中的变质安山岩有较强磁性,可产生明显的磁异常,而一些矿带上只有弱磁异常。因此,利用高精度磁法可研究有关地质构造问题和发现矿带,是基本的找矿方法。

(3) 钛矿石的电阻率平均为 $1\ 078\ \Omega \cdot \text{m}$,围岩的电阻率平均为 $1\ 472\ \Omega \cdot \text{m}$,两者相差约 $500\ \Omega \cdot \text{m}$ 。锐钛矿、钛铁矿和金红石均属电导体(李金铭,2005),它们的极化率平均为14%,而围岩的极化率平均为2.6%,两者的极化率相差一个数量级。可见,钛矿石与围岩具有明显的电性差异,特别是具有较大的

表1 羊蹄子山-磨石山矿区岩(矿)石物性统计

Table 1 Physical character statistics of rocks and ores from Yangtizishan-Moshishan ore district

岩(矿)石名称	标本数/块	密度/ kg/m^3		磁化率/ 10^{-6}SI		剩磁强度/ 10^{-3}A/m		电阻率/ $\Omega \cdot \text{m}$		极化率/%	
		变化范围	平均值	变化范围	平均值	变化范围	平均值	变化范围	平均值	变化范围	平均值
钛矿石	密度:190										
	磁性:33	2.56~3.92	2.97	3.9~217.7	48.45	135~41 698	4 122	542~2 293	1 078	2.9~34.9	14
	电性:6										
围岩	密度:51										
	磁性:51	2.60~2.77	2.73	1.2~608.8	33.26	9.5~63 192	44 770	157~4 946	1 472	1~6.2	2.6
	电性:29										

注:岩(矿)石标本的物性参数主要由中国地质科学院物化探研究所李磊和矿产资源研究所刘光海、高学东测定。

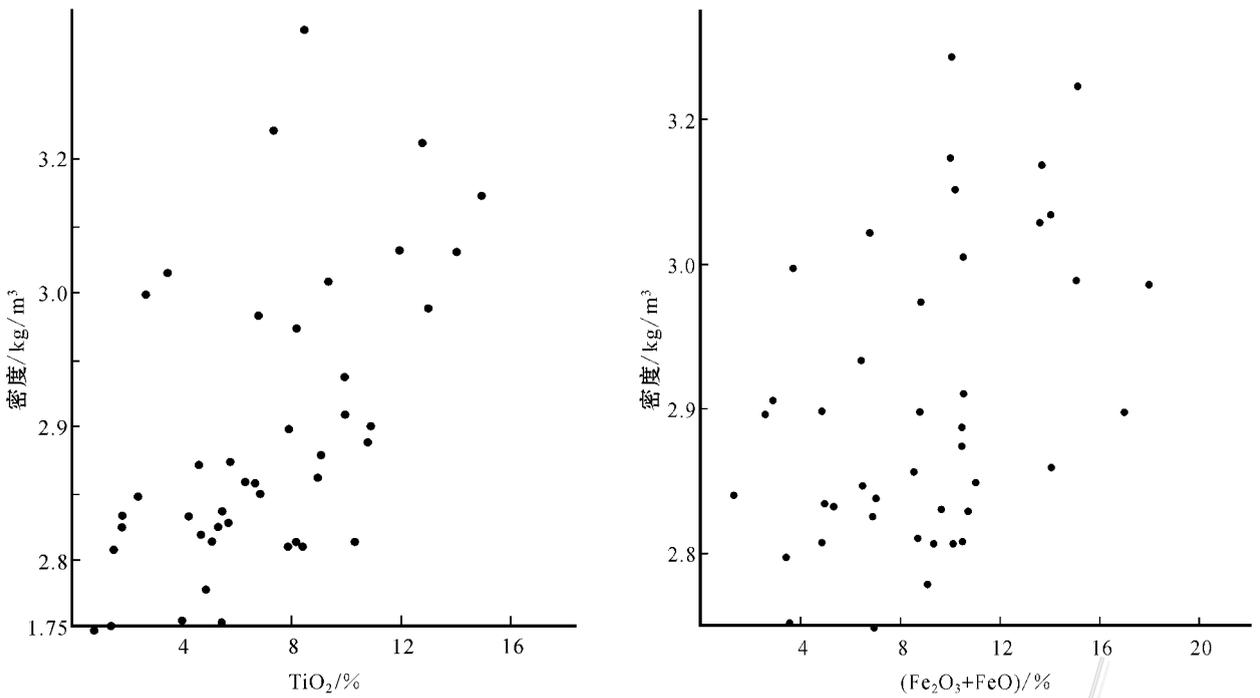


图 2 磨石山矿带钛矿石密度与 TiO₂ 及 Fe₂O₃ + FeO 含量的相关关系

Fig. 2 Correlation between titanium ore density and content of TiO₂ and (Fe₂O₃ + FeO) in Moshishan ore belt

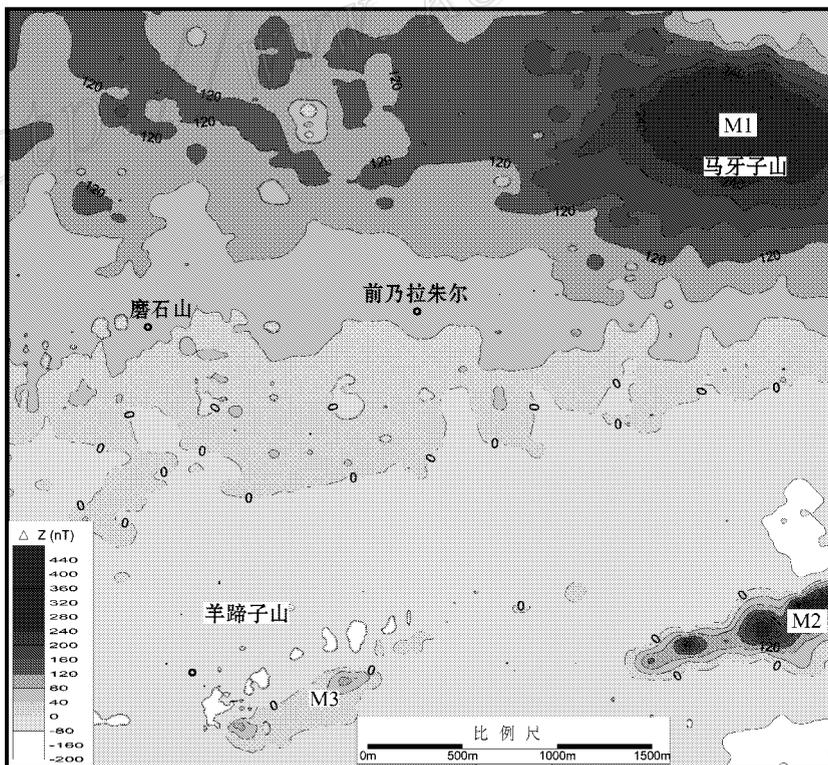


图 3 研究区的化极磁异常图

Fig. 3 Reduction to pole magnetic anomaly of the study area

极化率差异,因此,利用激发极化法及电磁法,在钛矿带上可获得明显的激电、电磁异常,是重要的找矿和矿体定位手段。

3 地球物理场特征分析

羊蹄子山-磨石山矿床是新发现的新型钛矿床,其地质、物化探工作程度很低。本研究项目于2005年及2007年2次在该矿区进行了1:1万的高精度磁法面积测量和高精度重力剖面测量工作(王君恒等,2008),共完成面积性磁测17.6 km²,高精度重力测量剖面8.16 km。

3.1 矿区磁异常的特征及推断解释

根据磁场的平面等值线图(图3)整个研究区的磁场背景北高南低,呈线性分布,与地层的走向、分布基本一致。研究区内的磁场可划分为北带、中带和南带3个异常区。其中,北带为高磁区,中带和南带为跳跃磁场变化区,分界线上可能存在地层褶皱或断裂构造。

北带异常区位于研究区的北部,为大于90 nT的高磁区,呈EW走向,异常平稳,地表大部分为第四系所覆盖,零星出露的岩石为片理化火山岩。该异常区内存在3个明显的局部磁异常,其中编号M1的地面高磁异常与M38号航磁异常(图1)相吻合,将在后文进行解释。中带异常区位于研究区的中部,磨石山矿床就在该异常区内,其磁异常强度为10~50 nT,呈EW向带状分布,被第四系覆盖,露头很少,据磁异常特征推测,该异常区内有岩浆活动和弱磁性岩体存在。南带异常区在研究区的西南部,面积较大,NE向延伸,其磁异常 ΔT 最大为300 nT,高磁异常有M2、M3(图3),羊蹄子山矿床有较弱的磁异常,该异常区大部分被第四系覆盖,有少量基性岩露头,根据异常特征和岩石露头判断,该区有强烈的岩浆活动,高磁异常由变质安山岩引起,岩体向南陡倾。

3.2 重点区域重、磁异常的推断解释及验证结果

磨石山矿床

磨石山矿床的地表有岩石和矿体出露,地层、矿体为NE走向。从 ΔT 异常平面等值线图上,具微弱磁异常,在重力剖面上有明显的重力异常,布格

重力异常 ΔG 值达 $0.6 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。由重、磁异常形态推测矿体向北缓倾(图4)。据物性测定结果,钛矿石基本无磁性,但其密度高于围岩,由此推断,重力异常是由钛矿体引起的。结合地质和重、磁异常特征综合分析,在磨石山布置了ZK1、ZK2和ZK6等3个验证钻孔。推断ZK1钻孔的见矿深度为60~64 m,实际见矿深度为49.2~53.2 m,矿体假厚度达4.0 m,控制矿体斜深约60 m(图4),推断ZK2孔的见矿深度为60~67 m,实际钻进94.1 m,在64.3~73.2 m处见到假厚度约8.7 m的矿体,控制矿体斜深约85 m(图5);ZK6孔分别在45~66 m和124.3~169 m处见到假厚度达21 m及44.7 m的厚大矿体(图5)。通过这3个钻孔的控制,并结合数

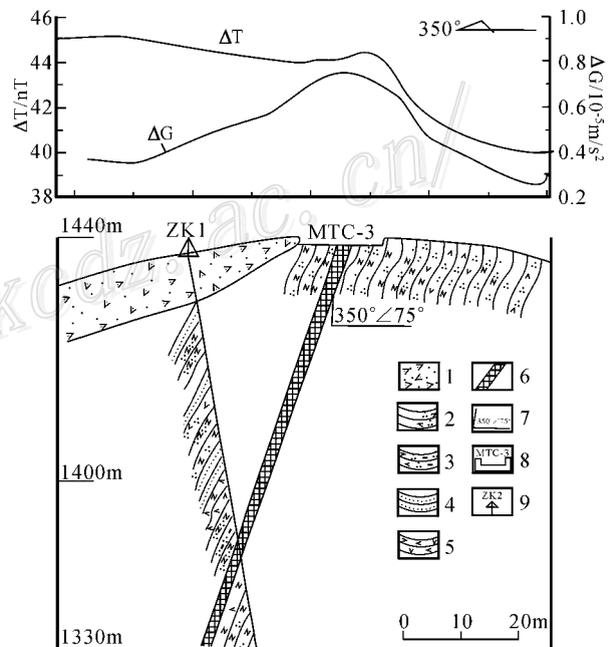


图4 磨石山矿床第6勘探线物探-地质综合剖面
(地质剖面据^①修改)

1—第四系;2—石英绢云片岩;3—含锐钛矿变质粉砂岩;4—含锐钛矿变质石英砂岩;5—斜长角闪岩;6—锐钛矿钛铁矿富矿体;7—地层产状;8—探槽及编号;9—验证钻孔及编号

Fig. 4 Geophysical and geological composite profile along No. 6 exploration line in Moshishan deposit (geological profile modified after Zhao et al., 2007^①)

1—Quaternary; 2—Quartz sericite schist; 3—Anatase-bearing meta-siltstone; 4—Anatase-bearing metamorphic quartz sandstone; 5—Plagioclase amphibolite; 6—Anatase and ilmenite ore body; 7—Attitude; 8—Exploratory trench and its serial number; 9—Verification drill hole and its serial number

① 赵一鸣,李大新,等. 2007. 内蒙古自治区正蓝旗羊蹄子山钛铁矿床预评价与研究结题报告. 内部资料.

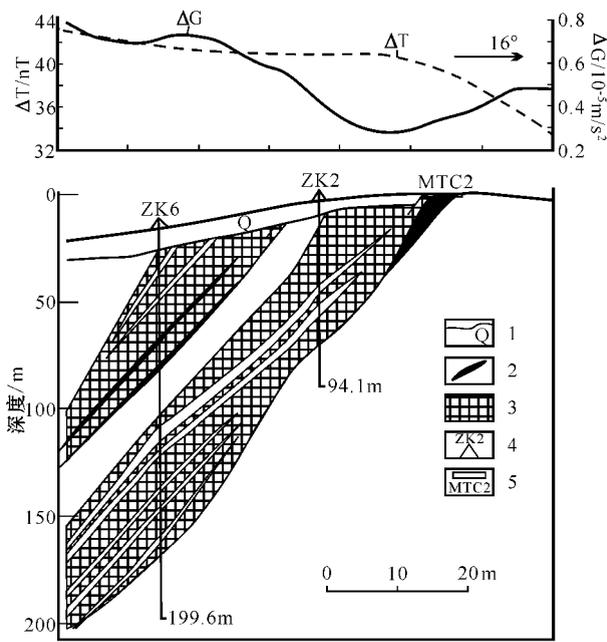


图 5 磨石山矿床第 8 勘探线物探-地质综合剖面 (地质剖面据赵一鸣等 2008 修改)
1—第四系；2—金红石富矿体；3—金红石贫矿体；
4—钻孔及编号；5—探槽及编号

Fig. 5 Geophysical and geological composite profile along No. 8 exploration line in Moshishan deposit (geological profile modified after Zhao et al., 2008)
1—Quaternary; 2—Rich rutile ore body; 3—Lean rutile ore body; 4—Drillhole and its serial number; 5—Exploratory trench and its serial number

条探槽的化学分析资料,综合分析表明,该矿床品位富,矿体向下延深大,初步推测已达大-中型规模,同时也证明了重力测量方法找矿效果明显。

羊蹄子山矿床

羊蹄子山矿床在 ΔT 平面等值线图上为局部弱磁异常(图 3), ΔT 最大为 60 nT,异常呈 NE 向延伸,根据地表岩石出露情况,其地层和矿体也均为 NE 走向。矿区内有明显的重力异常和弱磁异常,其布格重力异常 ΔG 值为 $0.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,磁异常 ΔT 为 50~100 nT,据此特征推断矿体向南陡倾。钛矿石呈弱磁性且密度高于围岩,据物性参数判断重、磁异常皆为钛矿体引起。结合地质资料分析,建议在重力异常中心实施钻探验证,在 YZK1 钻孔 33~45 m 之间见到了厚达 12 m 的钛矿体(图 6)。

M1 高磁异常——找矿远景区

M1 异常位于研究区的东北角,面积较大,曲线圆滑,形态规则,呈 EW 向延伸,磁异常 ΔT 最大为 500 nT,在其北部已出现明显的伴生负异常(图 3)。

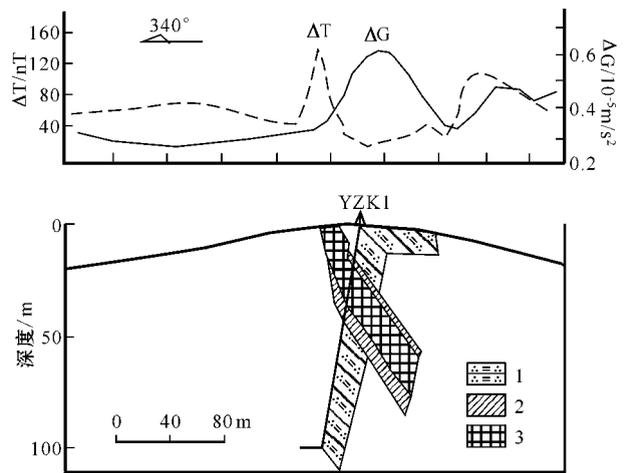


图 6 羊蹄子山矿床 YZK1 钻孔物探-地质综合剖面 (地质剖面据赵一鸣等 2008)
1—绢云石英片岩；2—锐钛矿贫矿；3—锐钛矿富矿
Fig. 6 Geophysical and geological composite profile of YZK1 drillhole in Yangtizishan titanium deposit (geological profile modified after Zhao et al., 2008)
1—Phyllic schist; 2—Lean anatase ore; 3—Rich anatase ore

该异常区被第四系覆盖,推测其有可能是由具磁性的矿体或变质安山岩引起的,故将其作为羊蹄子山-磨石山矿区外围的找矿重点远景区。为配合进一步的验证工作,笔者选择了穿过 M1 异常中心的 178 线的磁、重异常段作为典型剖面来进行剖面反演解释(图 7),其磁异常 ΔT 最大值达 500 nT,从重力剖面上看,其布格重力异常 ΔG 为 $0.4 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。

据 M1 磁异常平面图推断,磁性地质体呈近 EW 走向,向 SE 侧伏,倾向北,倾角较陡。利用 Encom 的 Model Vision 系统对 178 线(图 7)重磁异常段进行反演解释,结果显示,磁性地质体北倾,顶部埋深约 350 m,宽 960 m,向下延深 1 540 m(图 8)。由此可以推断,磁性地质体具规模大、埋深也较大的特点,是值得进一步研究、评价的磁异常。但由于其物探工作程度低,重力只测量了 1 条剖面,磁异常的定性、定量解释又有很大的不确定性(即多解性),因此,建议进一步开展高精度重、磁和激电测量并进行综合分析研究后,再进行异常的查证工作。

4 找矿方法探讨

如前所述,羊蹄子山矿体上有弱磁异常,其 ΔT 最大为 100 nT,NE 向延伸,其重力异常 ΔG 值达 0.5

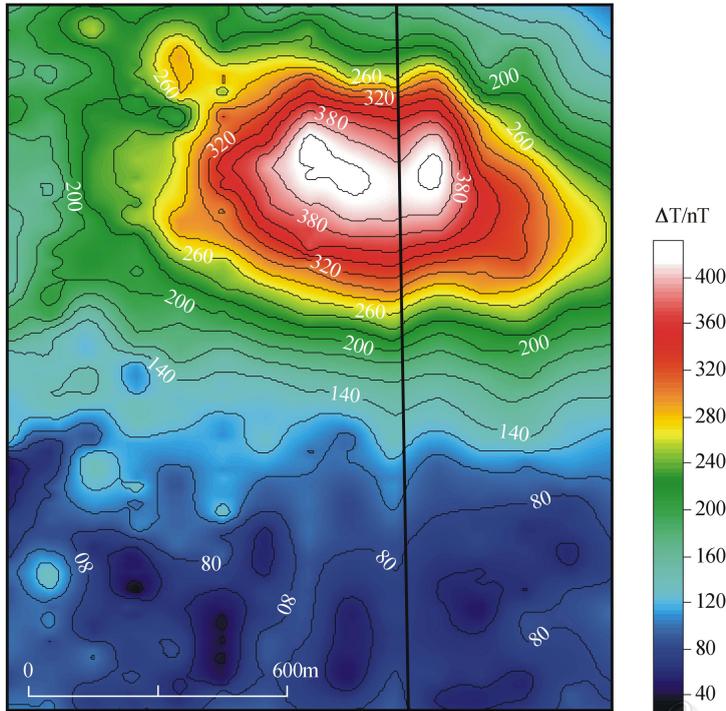


图 7 羊蹄子山-磨石山矿区马牙子山 M1 化极磁异常图

Fig. 7 Reduction to pole magnetic anomaly of Mayazishan M1 anomaly in Yangtizishan-Moshishan ore district

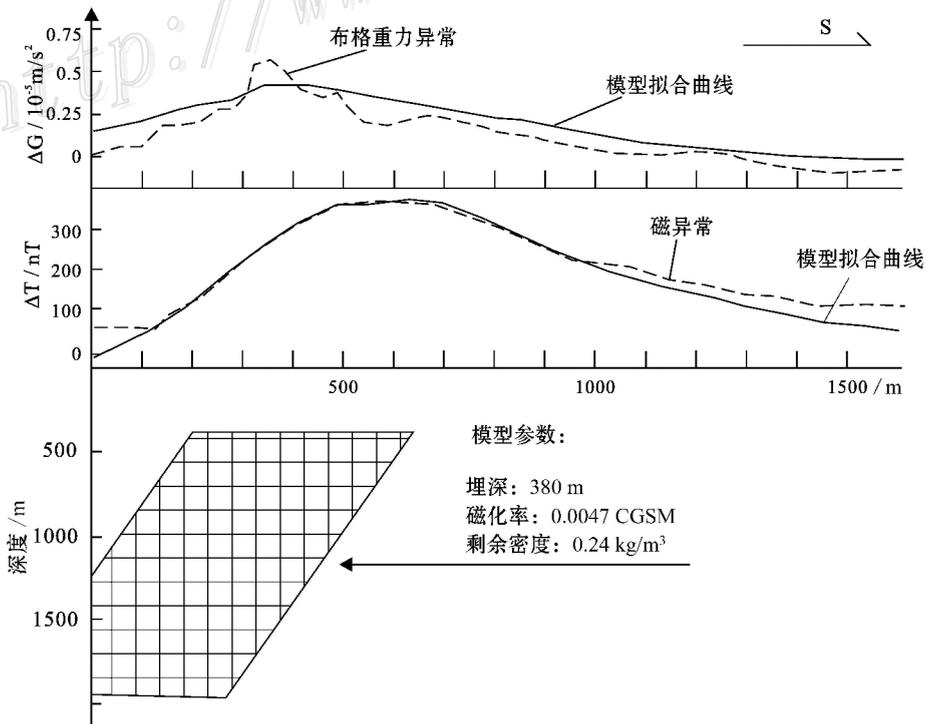


图 8 羊蹄子山-磨石山矿区马牙子山 M1 磁异常 178 线反演解释剖面图

Fig. 8 Inversion profile along No. 178 line of Mayazishan M1 magnetic anomaly in Yangtizishan-Moshishan ore district

$\times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 据此判断,矿体向南陡倾。在磨石山矿体上, ΔG 值达 $0.6 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, 判断矿体为向北缓倾。各条剖面上的钻探验证结果与物探推断解释基本吻合,因此笔者认为,高精度磁法测量是基本的找矿方法,高精度重力测量是有效的找矿方法。

根据物性特征,富钛矿石与围岩除具有明显的密度差外,由于锐钛矿、金红石、钛铁矿均属电导体,且具有较高的极化率,极化率差值达1个数量级,因此,可以利用激发极化法来圈定矿体及矿化带。其具体工作程序为:首先开展大功率的直流激电面积性测量,以发现与矿(化)体有关的高极化率异常,然后利用频谱激电(SIP)对重点异常区域进行测深,对极化率、时间常数、相关系数等参数进行综合分析(刘平生等,2005),进而区分矿与非矿异常、圈定富矿地段和开展矿体定位预测。

羊蹄子山-磨石山矿区属山丘草原地区,地形起伏平缓,地表覆盖广泛,是开展物探工作的有利地区。由于该矿是一个新的矿床类型,矿体与石英岩互层,单个矿体的长度、宽度都不大。因此,建议进一步进行大比例尺高精度的重、磁测量以及电法、电磁法的试验研究工作,总结出有效的综合找矿方法,建立地质-物探找矿模式,在面上推广应用。

志谢 赵一鸣研究员、李大新副研究员对本文进行了指导和帮助,白大明研究员仔细审阅了本文,并提出许多宝贵意见,在此,作者表示衷心感谢!

References

Dong Y J. 2005. Effects of applying gravity and magnetic method to exploration of iron deposits: Case study of Madao iron deposit in Jianchang County, Liaoning Province[J]. Mineral Deposits, 25(3): 21-32(in Chinese with English abstract).

Li D X, Zhao Y M, Feng C Y, Wu L S and Chen W M. 2008. SHRIMP U-Pb zircon dating of Mesoproterozoic anatase-rich ore beds and granite in Yangtizishan-Moshishan anatase deposit, Inner Mongolia, and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 27(4): 449-458(in Chinese with English abstract).

Li J M. 2006. Geoelectric field and electrical exploration[M]. Beijing: Geol. Pub. House(in Chinese with English abstract).

Liu G H. 1994. Synthetical methods and application example of mineral resources forecast[M]. Beijing: Geol. Pub. House(in Chinese).

Liu G H, Sun D M and Bai D M. 2000. Effects of geophysical and geochemical exploration in the Xiaorequanzi copper deposit and the integrated ore-prospecting mode[J]. Mineral Deposits, 19(1): 66-

74(in Chinese with English abstract).

Liu P S, Jiang W P and Sun W B. 2005. Using V8 acquisition system and CR method for oil/gas detection[J]. Equipment of Geophysics, 15(1): 46-49(in Chinese with English abstract).

Pan Q Y(Chief editor). 1999. Annals of geological mineral resources of the Inner Mongolia Autonomous Region[M]. Huhehot: Inner Mongolia People's Pub. House. 44-140(in Chinese).

Wang J H, Pan Z P, Meng G X and Liu G H. 2008. Metallogenic mode and exploration method for a new type metamorphosed sedimentary titanium deposit[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 32(4)(in press).

Wu X and Zhang J. 2006. Geographical distribution and characteristics of titanium resources in China[J]. Titanium Industry Progress, 23(6): 8-12(in Chinese with English abstract).

Zhao Y M, Li D X, Chen W M, Feng C Y and Sun W H. 2006. Yangtizishan metamorphosed sedimentary titanium deposit: Discovery of new genetic type of titanium deposit[J]. Mineral Deposits, 25(2): 113-122(in Chinese with English abstract).

Zhao Y M, Li D X, Wu L S, Chen W M, Feng C Y, Wang P H and Gao X D. 2008. Geology and geochemistry of Yangtizishan-Moshishan anatase ore deposit in Zhenglanqi County, Inner Mongolia: A summary of exploration and investigation work[J]. Mineral Deposits, 27(4): 425-448(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

董英君. 2005. 应用重磁方法勘查铁矿的效果[J]. 矿床地质, 25(3): 21-32.

李大新, 赵一鸣, 丰成友, 吴良士, 陈文明. 2008. 内蒙古羊蹄子山-磨石山锐钛矿床富矿层和花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 矿床地质, 27(4): 449-458.

李金铭. 2005. 地电场与电法勘探[M]. 北京: 地质出版社.

刘光海. 1994. 矿产预测的综合方法及应用实例[M]. 北京: 地质出版社. 13-25.

刘光海, 孙德梅, 白大明. 2000. 小热泉子铜矿床物化探找矿效果及综合找矿模式[J]. 矿床地质, 19(1): 66-74.

刘平生, 江纹波, 孙卫斌. 2005. 用于CR法的无线遥测式V8仪器采集系统[M]. 物探装备, 15(1): 46-49.

潘启宇(主编). 1999. 内蒙古自治区地质矿产志[M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社. 44-140.

王君恒, 潘竹平, 孟贵祥, 刘光海. 2008. 一个新的沉积变质型钛矿床的成矿模式及找矿方法[J]. 物探与化探, 32(4)(待刊).

吴贤, 张健. 2006. 中国的钛资源分布及特点[J]. 钛工业进展, 23(6): 8-12.

赵一鸣, 李大新, 陈文明, 丰成友, 孙文泓. 2006. 内蒙古羊蹄子山沉积变质型钛矿床——一个新的钛矿床类型的发现[J]. 矿床地质, 25(2): 113-122.

赵一鸣, 李大新, 吴良士, 陈文明, 丰成友, 王佩华, 高学东. 2008. 内蒙古正蓝旗羊蹄子山-磨石山锐钛矿床地质与地球化学——勘查和研究工作小结[J]. 矿床地质, 27(4): 425-448.