

王继春, 宋崇宇, 王志利, 等. 白云鄂博 REE-Nb-Fe 矿床地质与航磁、航放特征及其对找矿工作的启示[J]. 中国地质, 2016, 43(2): 594-606.
Wang Jichun, Song Chongyu, Wang Zhili, et al. A comprehensive comparative study of geological characteristics as well as aeromagnetic and aeroradiometric features of the Bayan Obo REE-Nb-Fe deposits and their implications for prospecting work[J]. Geology in China, 2016, 43(2): 594-606(in Chinese with English abstract).

白云鄂博 REE-Nb-Fe 矿床地质与航磁、航放特征 及其对找矿工作的启示

王继春^{1,2} 宋崇宇³ 王志利² 周路路² 张占飞² 胡巧娥²

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 内蒙古自治区地质调查院, 内蒙古呼和浩特 010020;
3. 中化地质矿山总局化工地质调查总院, 北京 100120)

摘要:通过对白云鄂博 REE-Nb-Fe 矿床的航磁及航放成果的分析, 结合矿床地质特征进行综合对比研究, 发现该矿床具有独特且典型的航磁、航放特征, 航磁异常特征显示矿区为强度较高的近东西向条带状正负伴生磁异常特征, 是具有较强磁性的矿体与弱磁性围岩反映; 航磁 ΔT_{\max} 为 5000 nT 以上, 航磁 ΔT_{\min} 为 -2000 nT, 有 30 余条测线上具有明显正负磁异常发育, 呈现多期次异常叠加特征, 属于不同期次、不同强度磁性体的反映, 说明该矿床经历过多期次构造热事件的叠加、改造活动。该矿床向下延深的规模随深度的变化有逐渐缩小的趋势, 当航磁 ΔT 等值线向上延拓 3000 m 时, 依然表现为较明显的正磁异常特征, 这说明该矿床在深部依然存在较明显的矿化现象。另外白云鄂博矿区航放特征具有醒目的总计数率、钾、铀、钍高值晕, 它们总体上呈近东西向带状展布。矿区处于航放总计数率高值区, 一般为 3000~15381 cps, 局部为团块状, 高值区范围大于矿区范围; 钾含量为 2.0%~2.8% 的偏高值, 矿床及附近局部为 2.8%~12% 的高值; 钍含量为 26×10^{-6} ~ 223×10^{-6} 。钍高值晕范围较赋矿的加里东中期第二次侵入的碳酸岩出露的范围要大; 铀含量一般为大于 1.6×10^{-6} 的偏高值, 矿床及附近局部为 2.8×10^{-6} ~ 9.1×10^{-6} 的高值。经综合分析, 充分证明该区的航磁、航放特征与矿床信息对应性较强。在今后寻找类似矿床的过程中, 可以将航磁正负伴生磁异常信息作为寻找铁多金属矿的有利信息, 将放射性核素钾、钍、铀等高值信息做为寻找稀土矿有利信息, 对找矿工作具有十分重要的指导意义。

关键词:白云鄂博 REE-Nb-Fe 矿床; 航磁特征; 航放特征; 综合对比; 内蒙古
中图分类号: P 624 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)02-0594-13

A comprehensive comparative study of geological characteristics as well as aeromagnetic and aeroradiometric features of the Bayan Obo REE-Nb-Fe deposits and their implications for prospecting work

WANG Ji-chun^{1,2}, SONG Chong-yu³, WANG Zhi-li²,

收稿日期: 2015-01-11; 改回日期: 2015-02-13

基金项目: 中国地质调查局天津地质调查中心优选项目(1212011220468)和内蒙古勘查资金项目(08-2-HK01)联合资助。

作者简介: 王继春, 男, 1985 年生, 博士生, 矿物、岩石、矿床学专业, 主要从事地质矿产调查及航磁查证工作;

E-mail: wangjichunmail@sohu.com。

ZHOU Lu-lu², ZHANG Zhan-fei², HU Qiao-e²

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Geological Survey of Inner Mongolia, Huhhot 010020, Inner Mongolia, China; 3. General Institute of Chemical Geology Survey, China Chemical Geology and Mine Bureau, Beijing 100120, China)

Abstract: Through analyzing the aeromagnetic and aeroradiometric results obtained in the Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit in combination with the comprehensive comparative study of its geological characteristics, the authors found that the Bayan Obo REE-Nb-Fe ore deposit has unique and typical aeromagnetic and aeroradiometric characteristics. The aeromagnetic anomaly characteristics show that the ore deposit is characterized by a high-intensity banded and nearly EW positive magnetic anomaly associated with a parallel positive anomaly, which is the reflection of the contact between strong magnetic orebodies and poor magnetic wall rocks. The aeromagnetic ΔT_{\max} value is over 5000 nT, and the ΔT_{\min} value is about -2000 nT. There are over 30 survey lines which indicate obvious positive-negative magnetic anomaly development and show that the superimposed anomaly characteristics are the reflection of magnetic rocks of varying ages and intensities. It indicates that the ore deposit has experienced superposition and transformation activities of tectonic thermal events of varying ages. The scale of ore deposit decreases gradually with the increasing depth of downward extension, but it still shows obvious positive magnetic characteristics while aeromagnetic ΔT contour exhibits upward continuation to 3000 m, which indicates that the ore deposit has obvious mineralization in the depth. In addition, the aeroradiometric characteristics of the Bayan Obo ore deposit show marked high value halos of total counting rate and potassium and uranium and thorium elements, and they all show nearly EW banded distribution. The mining area is located in the high value zone, with values between 3000 and 15381 cps and partially in lumpy form, and the range of the high value zone exceeds the range of the mining area. The potassium content is high with values between 2.0% and 2.8%, and partially even reaching 2.8%-12% in the ore deposit and adjacent areas. The thorium values are in the range of 26×10^{-6} - 223×10^{-6} , and the range of thorium high value zone is larger than the range of the second intrusive carbonatite that hosted the ore deposit in the middle Caledonian. The uranium values are generally in excess of 1.6×10^{-6} , with higher values between 2.8×10^{-6} and 9.1×10^{-6} in the ore deposit and adjacent areas. Through the comprehensive analysis, it is proved that the aeromagnetic and aeroradiometric characteristics are of highly consistent with ore deposit information. The aeromagnetic positive anomalies information can be used as favorable information to look for the iron-bearing polymetallic deposits, and the radioactive elements mainly including potassium, uranium and thorium with high values can be used as favorable information to look for rare earths ore. This understanding is of great guiding significance for the further prospecting work.

Key words: Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit; aeromagnetic characteristics; aeroradiometric characteristics; comprehensive comparative analysis; Inner Mongolia

About the first author: WANG Ji-chun, male, born in 1985, doctor candidate, mainly engages in geological and mineral investigation and aeromagnetic anomalies verification; E-mail: wangjichunmail@sohu.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program (No. 1212011220468) and Inner Mongolia Geological Exploration Fund (08-2-HK01).

1 引言

白云鄂博REE-Nb-Fe矿床是国际地质界公认的世界上最大的稀土矿床,同时又是一个备受国内外瞩目的巨型铁矿床,在矿床学和成矿理论研究中占有重要地位,之前许多学者对该矿床做过许多工作,包括矿床成因的研究^[1-4]、矿床形成时代的厘定^[5-15]、成矿构造环境的探讨^[16-17]及地球化学元素的分析^[18-21]等等,从不同方面对该矿床进行了研究。而本文主

要的侧重点是通过对该矿区开展的航空综合站测量结果进行综合研究,与矿床地质特征进行对比、分析,发现具有独特的航磁及航放特征。总结其地质及航磁、航放特征,为寻找类似的矿床起到指导作用。

2 矿区地质背景

白云鄂博矿区位于包头市白云鄂博区内,由东矿、西矿、主矿、都拉哈拉和东介勒格勒5个矿体组成。探明的稀土、铌储量规模达到世界罕见的超大

型, 铁矿也达到大型以上规模, 并伴生多种有益组分, 综合利用价值巨大(图1)。

大地构造位置属华北陆块北缘狼山—白云鄂博裂陷槽东段白云鄂博褶断束多组断裂复合部位。区内基底为新太古界至古元古界的正长岩、英云闪长岩和片麻岩等构成, 并保留有古元古界的被

动大陆边缘型沉积^[22], 中元古界的白云鄂博群由一套浅变质岩地层组成, 其间夹有碱性、基性火山岩层, 呈角度不整合覆盖于基底杂岩之上, 并共同经历了后期构造运动的改造作用^[7, 23]。在中元古代中期(1.4~1.2 Ga)的陆缘裂谷背景之下, 该区又迎来了第二次峰期裂解运动, 发生了大规模的幔源碳酸岩

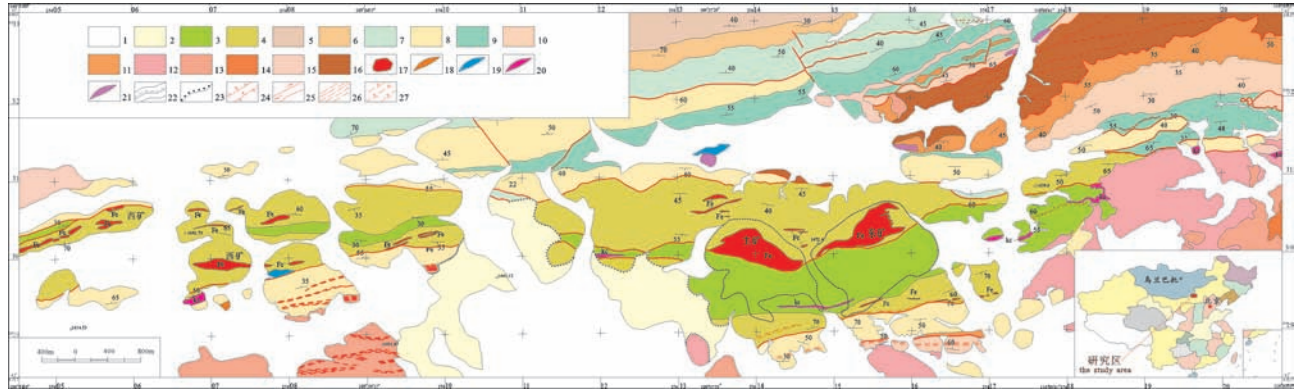


图1 白云鄂博矿区地质简图

- 1—第四系砂土、碎石; 2—古近—新近系上新统杂色砂质泥岩、砂岩、砂砾岩; 3—中元古界白云鄂博群毕鲁特组: 灰黑色、灰绿色萤石矿化钠铁闪石化富钾板岩、绢云母板岩、黑云阳起片岩, 钠铁闪石化白云岩、黑云母石英岩及铁矿体; 4—中元古界白云鄂博群白云岩组: 浅灰色萤石化细晶白云岩、褐灰色含磁铁矿细晶白云岩、夹水镁石岩、含磁铁矿粉晶灰岩、含磁铁矿细晶白云岩、灰色细晶灰岩、中晶白云岩、萤石矿化白云岩; 5—中元古界白云鄂博群哈拉霍埃特组二段: 灰色硅质泥岩夹变质中粗粒石英砂岩及板岩、灰白色变质中粒钙质砂岩夹粉砂质灰岩、泥灰岩; 6—哈拉堆埃特组二段: 灰色灰岩变质钙质砂岩; 7—中元古界白云鄂博群尖山组三段: 深灰色、灰黑色硅质板岩、变质钙质石英砂岩、炭质板岩、变质中粒长石英砂岩夹炭质板岩; 8—尖山组二段: 深灰色、灰白色变质粗粒砂岩、变质细粒砂岩、不等粒石英砂岩及变质含砾岩屑长石砂岩; 9—尖山组一段: 灰黑色、暗灰色粉砂质绢云母板岩、含粉砂铁锰质板岩、炭质板岩夹灰色粉砂质板岩、变质含砾中细粒长石英砂岩; 10—都拉哈拉组二段: 灰色、灰白色变质中粒石英砂岩、变质细粒石英砂岩; 11—都拉哈拉组一段: 灰色、深灰色、暗灰色变质细粒石英砂岩夹变质中粒石英砂岩、变质粉砂质泥岩夹变质石英岩透镜体、中粗粒含砾长石英砂岩变质砾岩不等厚互层; 12—侏罗纪花岗岩; 13—二叠纪花岗岩; 14—石炭纪花岗岩闪长玢岩; 15—志留纪细粒闪长岩; 16—早古生代片麻状黑云母斜长花岗岩; 17—铁矿体; 18—花岗岩脉; 19—闪长岩脉; 20—碳酸岩脉; 21—石英脉; 22—实测地质界线、实测平行不整合界线、角度不整合界线; 23—超动侵入界线; 24—实测正断层、实测逆断层; 25—实测平移断层、性质不明断层; 26—糜棱岩带; 27—构造破碎带

Fig. 1 Geological sketch map of the Bayan Obo ore deposit

- 1—Quaternary sand and gravel; 2—Upper Tertiary Pliocene mottled sandy mudstone and sandstone and conglomerate; 3—Middle Proterozoic Bayan Obo Group Birut Formation: gray-dark and gray-green potassium-rich slate with fluorite and iron-sodium-amphibole mineralization, sericite slate, biotite actinolite schist, sodium-iron amphibolization containing dolomite, biotite quartzite and orebody; 4—Middle Proterozoic Bayan Obo Group dolomite formation: light gray fine-grained dolomite with fluoritization, grayish brown fine-grained dolomite containing magnetite, brucite, powder limestone containing magnetite, fine-grained dolomite containing magnetite, gray fine-grained limestone, dolomite with fluorite mineralization; 5—Middle Proterozoic Bayan Obo Group Halahuoyite Formation second member: gray siliceous mudstone with coarse-grained metamorphic quartz sandstone and slate, gray medium-grained metamorphic calcareous sandstone with silty limestone and marl; 6—Haladuiyite Formation second member: gray limestone and metamorphic calcareous sandstone; 7—Middle Proterozoic Bayan Obo Group Jianshan Formation third member: dark-gray and black silicalite slate, metamorphic calcareous quartz sandstone, carbonaceous slate, medium-grained metamorphic feldspar quartz sandstone with carbonaceous slate; 8—Jianshan Formation second member: dark gray and gray metamorphic coarse sandstone, fine-grained metamorphic sandstone, seriate quartz sandstone and metamorphic rock debris feldspathic sandstone containing conglomerate; 9—Jianshan Formation first member: dark gray silty silk mica slate, iron-manganese slate containing silty, carbonaceous slate with gray silty slate, fine-grained metamorphic feldspar quartz sandstone containing conglomerate; 10—Dulahala Group second member: gray metamorphic medium-fine grained quartz sandstone, fine-grained metamorphic quartz sandstone; 11—Dulahala Group first member: gray-dark gray fine-grained metamorphic quartz sandstone with medium-grained metamorphic quartz sandstone, metamorphic silty mudstone with metamorphic quartzite lenses, medium-coarse feldspar quartz sandstone containing conglomerate with metamorphic conglomerate interbedded with unequal thickness; 12—Jurassic granite; 13—Permian granite; 14—Carboniferous corcovadite; 15—Silurian fine-grained diorite; 16—Early Paleozoic gneissic biotite plagiogranite; 17—Orebodies; 18—Granite veins; 19—Diorite veins; 20—Carbonate veins; 21—Quartz veins; 22—Measured geological boundaries; 23—Measured parallel unconformity, angular unconformity; 24—Ultra-dynamic intrusive boundaries; 25—Measured normal faults, Measured reverse faults; 26—Measured parallel displacement faults, faults with unknown nature; 27—Tectonic fracture zones

浆活动,并伴有大量基性岩墙群的侵入,在白云鄂博地区出现了大量碳酸岩与碱性基性岩共生的现象^[6]。同时形成了早期的稀土矿化,到了新元古代早期(1.1~0.8 Ga),白云鄂博地区在此期间也经历了强烈的碰撞造山运动,产生的壳源花岗质岩浆侵入到早期矿体下部的碳酸岩岩浆房内,交代形成富含REE、Fe、Nb的矽卡岩熔浆,向上侵位到矿体内部,因而此时段亦为该区REE-Nb-Fe的峰期成矿时限^[24]。

到早古生代初期,随着西伯利亚板块向南与华北板块拼合碰撞,该矿床遭受强烈的挤压变形和改造,导致矿石内部部分同位素体系发生重置(如Th-Pb体系)。在后造山的伸展阶段,热液流体的作用下,矿石内部的矿物发生重结晶作用,并沿着张性裂隙充填形成脉状矿化,但其规模远大于峰期矿化,最终形成白云鄂博REE-Nb-Fe矿床。此后的晚古生代的华力西运动在该区发育了大量的花岗质岩浆活动,但与该区的主体成矿作用无密切关系^[25]。

3 矿床地质特征

白云鄂博REE-Nb-Fe矿分布于矿区白云岩与尖山组板岩接触界线之中,其范围东西14 km,南北宽1~2 km,对于稀土矿来说,整个白云岩都是矿体,而对于铁矿,有大小矿体70余个。自西向东有西矿、主矿及东矿、东介勒格勒和都拉哈拉5个矿体。这些矿床中的主要矿体均受向斜构造的控制。铁矿体呈层状、似层状和大的扁豆体赋存于中新元古界白云鄂博群白云岩、铁质白云岩、富钾板岩之间。矿区已发现了73种元素^①,除铁、铌、稀土外,还有多种分散元素。矿床中铁的含量以块状铁矿石最高,TFe平均58.78%,稀土元素主要为铈族元素,占稀土总量的97%,稀土总量以萤石型的矿石最高,矿石中普遍含富铌贫钽,Nb₂O₅含量以钠辉石型和萤石铁矿石最高,平均0.16%。放射性元素以钍较高ThO₂为0.029%~0.051%,稀散元素有Ga、In、Sc、Rb、Cs及Zr和Hf,各元素分布于白云岩与尖山组板岩接触界线之中。其他元素Na、F、P、K、S、Ba的含量较高,分别富集于铁围岩白云岩及富钾板岩中。

白云鄂博铁-铌稀土矿的矿物组成复杂^[26],主要包括磁赤铁矿、磁铁矿、铁矿、镜铁矿、褐铁矿、水赤

铁矿、菱铁矿、铁白云石等160余种铁矿物。稀土矿物有独居石、氟碳铈矿、氟碳铈钒矿等18种。铌矿物有铌铁金红石、铌铁矿、易解石、烧绿石等19种。

4 成矿(岩)时代

白云鄂博矿床成矿的时间跨度较大,经历的构造事件十分复杂。所以其矿床本身及其围岩内同位素信息记录的不同时期的构造-岩浆活动亦复杂多样,这也是长期以来不同的研究者在该区取得的成矿年龄差别悬殊,从而对矿床成因存在争论的主要原因。

根据刘健等对基底斜长片麻岩进行的高精度的锆石SIMS U-Pb年龄测定^[27],得到了多组基底年龄为2.0~2.1 Ga,这组年龄与范宏瑞等获得的碳酸岩墙捕获锆石的年龄(2070±33) Ma在误差范围内一致^[11],也与许多学者在华北克拉通内部(如溥坨、阜平群等)获得的2.0 Ga左右的岩浆作用事件一致^[28-29],反映了该区的一次重要的岩浆作用事件,而(2070±33) Ma这一年龄应为碳酸岩墙穿越基底所捕获的基底岩石中锆石的年龄,应为基底正片麻岩原岩的形成年龄,指示了白云鄂博地区基底的形成年龄下限。王凯怡认为碳酸岩墙的侵位最早可追溯至2.0 Ga,在1.4~1.2 Ga,似乎也有一期火成碳酸岩墙侵位,在1000~800 Ma时有早期稀土矿化,在500~400 Ma时强烈的构造运动使火成碳酸岩的岩浆来源区有所活化,大量的流体逸出并携带着极其丰富的稀土,白云岩岩墙即为该阶段的产物,其稀土量是早期岩浆阶段的数倍或十多倍,它与白云鄂博稀土矿化有直接关系^[23]。任英忱等获得的碳酸岩墙周围蚀变带中钠闪石Ar-Ar坪年龄为(1288±12) Ma^[4],也间接验证了碳酸岩墙的侵位时代。大量的岩(矿)石及稀土矿物的U-Pb、Pb-Pb、Sm-Nd同位素定年结果显示,该区赋矿白云岩、碳酸岩脉、基性岩墙群以及早期REE矿化时代大致为1.4~1.2 Ga^[24,28,30-31],而REE-Fe-Nb峰期矿化年龄主要集中在1.1~0.8 Ga^[24,29,32-33]。

综上所述,本文基本认同白云鄂博矿床的成矿年龄应当晚于1.4~1.2 Ga,早于400 Ma(矿体中硫化物形成)的观点。这与章雨旭等提出的该矿床成矿(岩)时间晚于或等于(1125.8±32.5) Ma(Sm-Nd同位素时钟启动)^[23],早于或等于(439±86) Ma的观点相吻合。

①内蒙古自治区地质调查院. 中华人民共和国区域地质调查报告,K49C003002,白云鄂博幅(250000). 2003.

5 矿床成因类型

白云鄂博铁铌稀土矿床是赋存于华北陆块北缘中—新元古界白云鄂博群的一个极其独特的巨型矿床。它以其复杂的成矿条件, 极其丰富的铌稀土矿产资源, 吸引着国内外的诸多地质科研单位和地质学者对其进行调查研究, 对铌稀土的主要赋矿岩石—白云岩的成因属性以及与其紧密相关铁矿成因, 先后提出不同的学术观点^[34-36], 争论的焦点主要是沉积的观点和岩浆成因的观点。该矿床的成因机制问题一直存在着争议, 目前学术界的主流观点是, 来自地幔的深源流体沿断裂上升, 进入断陷海盆, 与海水混合、沉积, 从而形成喷溢沉积—热液交代型的铁—铌—稀土矿床^[37-40]。

作者通过对矿区进行调查发现, 铁矿成因既有沉积变质型的磁铁矿英岩型铁矿, 又有与碳酸岩有关的岩浆成因的浸染型铁—稀土矿。而铌稀土矿与岩浆热蚀变密切相关。综合以上观点, 本文认为矿床属沉积变质叠加后期热液改造—复合成因型铁矿床。

6 矿床地球物理特征

6.1 白云鄂博地区岩(矿)石磁性特征

在白云鄂博矿体及其围岩内采取60 cm×60 cm×60 cm的物性标本, 经内蒙古自治区地质调查院实验室破碎, 选择较为新鲜、具有代表性的岩(矿)石放入15 cm×15 cm×15 cm规格的物性检测盒内, 使用质子磁力仪(G856AX型)测出其磁化率及剩磁值等参数。

采样地点主要包括该矿床正在开采的矿体及其围岩。所采物性样根据白云鄂博矿床发育的主要成矿阶段大致可分为六类, 包括代表基底变质岩的黑云斜长片麻岩、云母石英片岩等样品; 在中元古代中期—新元古代早期发育的第二次峰期裂解运动及碰撞运动, 分异而形成的碱性碳酸岩浆内取得矿化白云岩、钠闪石化白云岩、钠闪石等代表碳酸岩的样品及在基性岩内采取辉长闪长岩、玄武岩等样品; 代表晚古生代华力西期运动形成的侵入岩有细晶花岗岩、花岗岩脉等; 在矿体内采取白云石化磁铁矿、角闪石化磁铁矿、赤铁矿化磁铁矿、磁铁矿化赤铁矿、条带条纹状磁铁矿化赤铁矿、赤铁矿(白云矿区)等样品; 另外还采取了一批与成矿无紧密关系的围岩样品; 共取得1146套样品。

从物性测量结果(图2, 表1)可以看出, 样品的磁化率与剩磁呈正相关关系, 其中磁铁矿化碳酸岩类及矿石的物性值普遍较高, 磁铁矿或含磁铁矿化的岩(矿)石磁性最强, 磁化率均值基本在 $10000 \times 10^{-5} \text{SI}$ 以上, 其中赤铁矿化磁铁矿最高值可以达到 $150000 \times 10^{-5} \text{SI}$ 以上, 但与其伴生的赤铁矿石的磁性较弱; 基底变质岩的磁性较强, 磁化率均值为 $1200 \times 10^{-5} \text{SI} \sim 9000 \times 10^{-5} \text{SI}$; 矿化的碳酸岩类岩石的磁性特别强, 磁化率均值约为 $11000 \times 10^{-5} \text{SI} \sim 50000 \times 10^{-5} \text{SI}$; 基性岩类岩石的磁性也相对较强, 磁化率均值为 $1000 \times 10^{-5} \text{SI} \sim 9000 \times 10^{-5} \text{SI}$, 华力西期侵入岩及近矿围岩磁性较弱, 磁化率均值为 $300 \times 10^{-5} \text{SI} \sim 2000 \times 10^{-5} \text{SI}$, 大部分样品的磁化率均值在 $1300 \times 10^{-5} \text{SI}$ 以内。

从物性数据分析, 基底老变质岩具有一定的磁性; 与碳酸岩同时形成的矿体具有较强的磁性, 在这个过程中磁性矿物富集使得白云岩发生磁铁矿化和钠闪石化等矿化蚀变现象, 形成的岩(矿)石均具有了较强的磁性, 与其伴生的基性岩同样具有较强的磁性。后期侵入的岩体具有较弱的磁性, 与主矿体成矿无密切关系。

6.2 航磁特征

对白云鄂博矿区开展1:5万航磁、航放综合站测量工作(测量范围覆盖了白云鄂博矿床的主矿、东矿、西矿3个矿体), 通过对所测量的数据进行处理与转

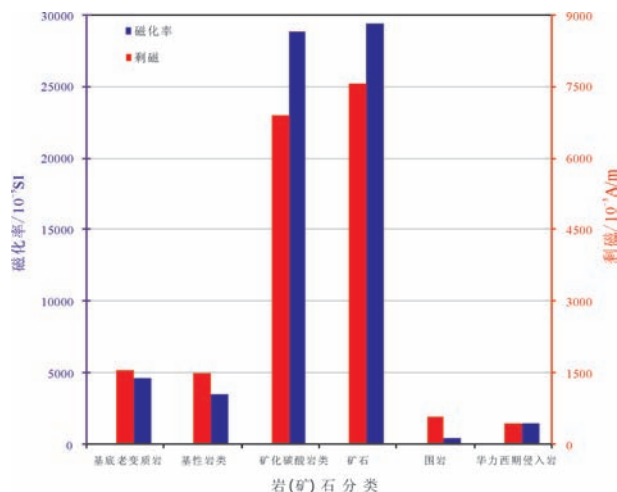


图2 白云鄂博矿区物性参数统计直方图

Fig.2 Physical parameters statistical histogram of the Bayan Obo ore deposit

表1 白云鄂博岩(矿)石磁性参数统计
Table 1 Rock and ore parameter statistics of the Bayan Obo ore deposit

| 岩矿石名称 | 统计 块数 | 磁化率/ 10^{-3} SI | | | 剩磁/ $(10^{-3}$ A/m) | | | 样品类型 | |
|--------------|----------|-------------------|--------|--------|---------------------|------|-------|------------|----|
| | | 极大值 | 极小值 | 均值 | 极大值 | 极小值 | 均值 | | |
| 黑云母石英片岩 | 23 | | | 8570 | | | 688 | 基底 老变质岩 | |
| 黑云斜长片麻岩 | 31 | 12824 | 1177 | 4656 | 8698 | 48 | 1330 | | |
| 板岩 | 36 | 6546 | 218 | 1266 | 1138 | 98 | 466 | | |
| 玄武岩 | 69 | 2398 | 739 | 1300 | 13008 | 868 | 3456 | 基性岩类 | |
| 安山岩 | 341 | 3340 | 339 | 1010 | 3200 | 165 | 695 | | |
| 辉长闪长岩 | 19 | 14665 | 4989 | 8868 | 835 | 0 | 366 | | |
| 斜长角闪岩 | 23 | 18225 | 356 | 3008 | 17736 | 172 | 1528 | | |
| 钠闪石 | 8 | | | 47256 | | | 13480 | | |
| 磁铁矿化白云岩 | 66 | 35218 | 6916 | 27796 | 10000 | 1000 | 5610 | 碳酸岩类 | |
| 钠闪石化白云岩 | 25 | | | 11580 | | | 1636 | | |
| 白云石化磁铁矿 | 75 | 94206 | 28268 | 71946 | 15000 | 7500 | 21700 | | |
| 角闪石化磁铁矿 | 13 | | | 49662 | | | 38380 | | |
| 赤铁矿化磁铁矿 | 30 | 192254 | 110538 | 155252 | 27200 | 7800 | 14290 | | |
| 磁铁矿化赤铁矿 | 63 | 200960 | 9420 | 40506 | 16000 | 3750 | 4742 | | |
| 条带状纹状磁铁矿化赤铁矿 | 30 | 52128 | 426 | 4916 | 5545 | 343 | 786 | | |
| 赤铁矿(东山) | 16 | 360 | 0 | 108 | 3438 | 66 | 882 | 矿石 | |
| 赤铁矿(C139) | 18 | 436 | 22 | 106 | 898 | 66 | 206 | | |
| 赤铁矿(白云北矿) | 35 | 403 | 135 | 235 | 1488 | 380 | 860 | | |
| 赤铁矿(东山铁矿) | 46 | 386 | 89 | 176 | 2306 | 487 | 1216 | | |
| 褐铁矿 | 13 | 1805 | 456 | 887 | 708 | 170 | 115 | | |
| 含铁石英岩 | 9 | 858 | 0 | 298 | 1200 | 48 | 176 | | |
| 板岩(近矿围岩) | 26 | 1637 | 128 | 349 | 560 | 39 | 139 | | |
| 白云岩(近矿围岩) | 38 | 4260 | 407 | 1425 | 1600 | 126 | 477 | | |
| 炭质板岩 | 25 | 315 | 58 | 123 | 526 | 266 | 368 | | 围岩 |
| 高岭土化含铁板岩 | 3 | 316 | 269 | 299 | 2651 | 321 | 986 | | |
| 绢云母化炭质板岩 | 13 | 466 | 68 | 148 | 1811 | 330 | 936 | | |
| 细晶花岗岩 | 41 | 1958 | 380 | 998 | 2212 | 103 | 408 | 华力西 侵入岩 | |
| 细晶岩 | 6 | 2817 | 1673 | 2205 | 386 | 135 | 301 | | |
| 花岗岩脉 | 5 | 2065 | 740 | 1286 | 995 | 219 | 566 | | |

注:物性测量使用质子磁力仪(G856AX),由内蒙古地质调查院物探所测得数据,岩性鉴定由内蒙古地质调查院岩矿鉴定室完成。

换,获得一套比较完整、系统、具有代表性的航磁、航放数据。对其进行综合研究、对比,发现具有独特的航磁及航放特征,与矿床地质信息对应性较强。

白云鄂博矿床地质特征与1:5万航磁异常特征对应性较好(图3-j),异常呈东西向带状展布,长近15 km,宽1.5 km;白云鄂博矿床处于高磁异常区中

心部位,该区为强度较高的条带状正负磁异常特征,是具有较强磁性的矿体与弱磁性围岩的反映。根据航磁 ΔT 等值线平面图(图3-a)显示:航磁 ΔT_{\max} 值达5000 nT以上,北侧有负磁异常伴生,航磁 ΔT_{\min} 为-2000 nT,该矿床处于正负磁异常叠加部位,根据航磁 ΔT 剖面平面图(图3-b)显示:航磁值为-

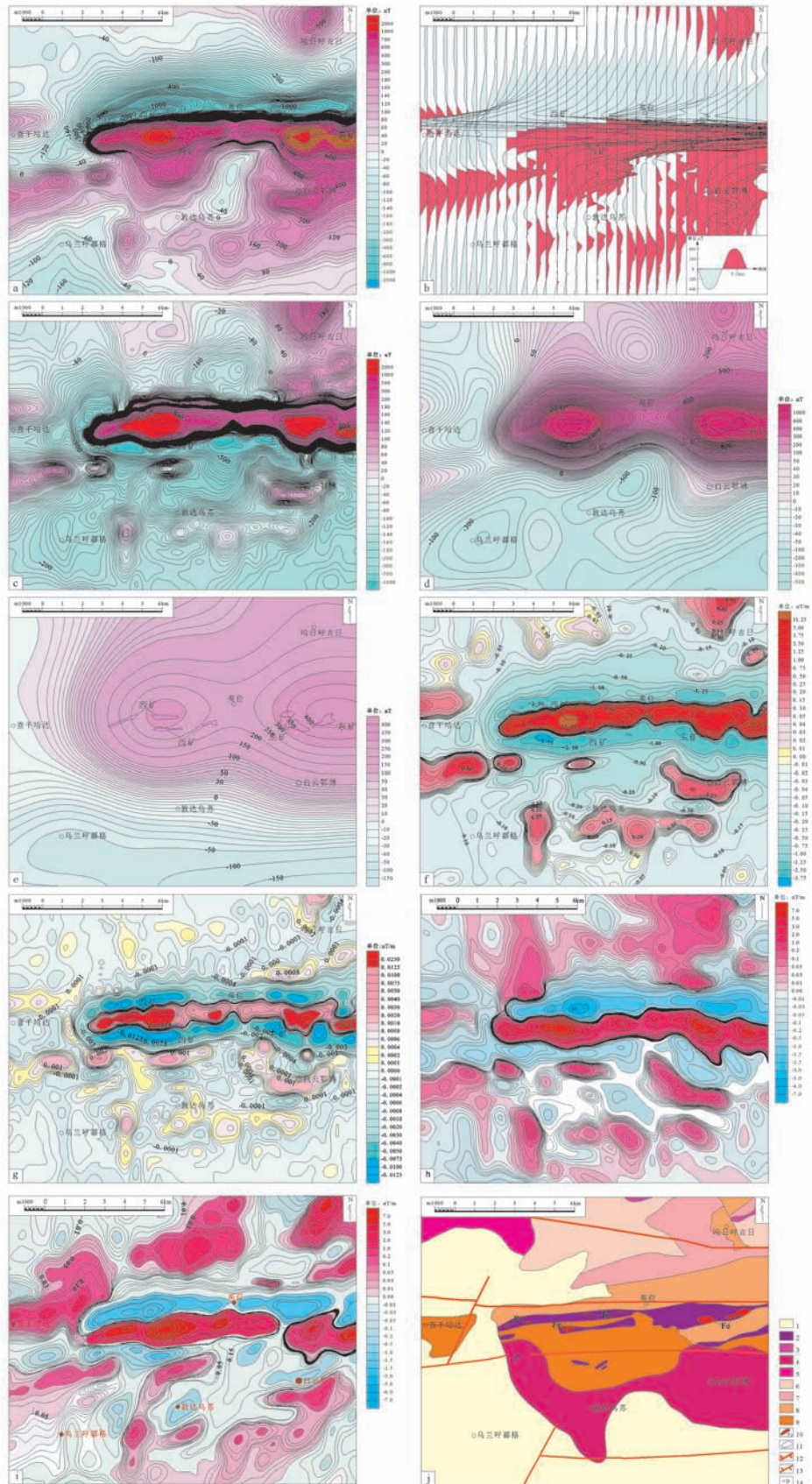


图3 白云鄂博地区航磁异常特征及地质简图

a—航磁 ΔT 等值线平面图; b—航磁 ΔT 剖面平面图; c—航磁 ΔT 化极等值线平面图;
 d—航磁 ΔT 上延1000 m等值线平面图; e—航磁 ΔT 上延3000 m等值线平面图; f—航磁 ΔT 一阶导数等值线平面图; g—航磁 ΔT 二阶导数等值线平面图; h—航磁 ΔT 化极45°方向导数等值线平面图; i—航磁 ΔT 化极135°方向导数等值线平面图; j—岩性构造简图;
 1—新近系上新统; 2—碳酸盐岩; 3—二叠纪花岗岩; 4—石炭纪花岗岩; 5—石炭纪花岗岩闪长岩; 6—中上元古界白云鄂博群比鲁特组: 灰黑色板岩、细粒石英砂岩; 7—中上元古界白云鄂博群哈拉霍疙特组: 变质砾岩、变质砂岩、变质粉砂岩、灰岩; 8—中上元古界白云鄂博群尖山组: 黑色、灰黑色板岩、硅质板岩、变质砂岩、灰岩; 9—中上元古界白云鄂博都拉哈拉组: 灰白色变质石英砂岩夹砾岩、石英岩; 10—铁矿;
 11—矿体范围; 12—二级断裂; 13—三级断裂; 14—城镇居民点

Fig. 3 Aeromagnetic characteristics plans and geological sketch map of the Bayan Obo ore deposit

a—Aeromagnetic ΔT contour plan; b—Aeromagnetic ΔT section plan; c—Aeromagnetic ΔT contour plan of poles; d—Aeromagnetic ΔT extension of 1000 m contour plan; e—Aeromagnetic ΔT extension of 3000m contour plan; f—Aeromagnetic ΔT first derivativ contour plan; g—Aeromagnetic ΔT second derivative contour plan; h—Aeromagnetic ΔT 45°derivativ contour plan; i—Aeromagnetic ΔT 135°derivative contour plan; j—Lithostructural sketch map;

1—Neogene Pliocene strata; 2—Carbonate; 3—Permian granites; 4—Carboniferous granite; 5—Carboniferous granodiorite; 6—Upper-Middle Proterozoic Bayan Obo Group Bilut Formation: black slate gray, fine-grained quartz sandstone; 7—Upper-Middle Proterozoic Bayan Obo Group Halahuoqite Formation: metamorphic conglomerate, metamorphic sandstone, siltstone metamorphic limestone; 8—Upper-Middle Proterozoic Bayan Obo Group Jianshan Formation: black, gray and black slate, siliceous slate, metamorphic sandstone, limestone; 9—Upper-Middle Proterozoic Bayan Obo Group Dulahala Formation: gray metamorphic quartz sandstone conglomerate, quartzite; 10—Iron deposit; 11—Range of orebody; 12—Secondary faults; 13—Third-order faults; 14—Urban settlements

2500~6000 nT, 在32条测线上具有明显正负磁异常特征, 航磁值梯度较高, 正负形态变化明显, 具有明显的多次异常叠加特征, 属于不同期次、不同强度磁性体叠加的反映, 说明该矿床经历过多次构造热事件的叠加、改造活动, 这也与许多学者提出的白云鄂博矿床是以沉积作用为主、多种地质作用叠加的复杂矿床观点相吻合^[14]。

根据航磁 ΔT 化极等值线平面图(图3-b)及上延1000 m (3000 m)等值线平面图(图3-c~d)上显示: 航磁异常由两处异常中心组成, 与矿体范围吻合, 对比 ΔT 等值线平面图, 可以发现其幅值随上延深度的变化可能有逐渐变小的趋势。向上延拓1000 m时, 其航磁 ΔT_{\max} 值为2000 nT, 与之伴生的负磁异常明显减弱; 向上延拓3000 m时, 依然处在较明显的正磁异常中, 航磁 ΔT_{\max} 值为1000 nT以上, 这说明该矿床规模较大, 而且在深部存在一定的延深。另外结合几种不同深度的 ΔT 化极上延等值线平面图可以推断出该矿床的整体倾斜方向为南西向。

通过 ΔT 化极垂向一阶导数等值线平面图(图3-f)及 ΔT 化极垂向二阶导数等值线平面图(图3-g)上信息可以发现: 异常呈东西向带状展布, 长近15 km, 宽1.5 km; 该矿床处于异常区中心部位, 主要由3处异常中心组成, 与矿体范围对应较好。最高值出现在西矿体部位, 垂向一阶导数最高值可达11.6 nT, 垂向二阶导数最高值可达0.03 nT。通过垂向导数图, 可以对磁性体边界做出准确的判断, 而通过 ΔT 化极45°方向导数等值线平面图(图3-h)及 ΔT

化极135°方向导数等值线平面图(图3-i), 推断出矿体南北两侧有二级、三级断裂构造的存在。对航磁数据的延拓求导综合分析, 使得深部断裂构造和磁性地质体的形态特征变得更加清晰明朗。

从航磁异常特征、形态分析, 矿体向南西倾斜, 下延深度较大, 异常至少由3个主要矿体引起。根据矿体与航磁异常的对应关系, 认为矿床是由多期次叠加、改造形成。中间航磁正磁异常为主矿和东矿引起, 西侧两处正磁异常为西矿所引起。西矿航磁异常的规模远大于地表揭露的矿体规模, 并有两个异常中心, 因此认为西矿为一巨大的隐伏磁性矿体。在西矿区经进一步勘探工作, 现已证实西侧磁异常为巨大的隐伏矿体。结合该矿区物性特征, 进而证实该地区航磁正磁异常主要由磁铁矿或含磁铁矿化的岩(矿)石、碳酸岩(白云鄂博铁、铌、稀土矿的成矿母岩)及基性岩经多期次构造-叠加热事件等共同引起的磁异常。

6.3 矿床航放特征

从矿区内所获得的航放数据可以看出(图4): 航放高值区与稀土矿体范围相吻合或略大于矿体范围(图4-f)。白云鄂博矿区处于航放总计数率高值区, 在3000~15381 cps, 总体呈现东西向带状展布, 局部为团块状, 高值区范围大于矿区范围(图4-a); 白云鄂博矿区大部分区域钾含量为2.0%~2.8%的偏高值, 矿床及附近局部为2.8%~12%的高值, 呈片状东西向排列(图4-b)。白云鄂博矿区钍含量呈现为大面积醒目的近东西向带状展布的高值区, 钍含量

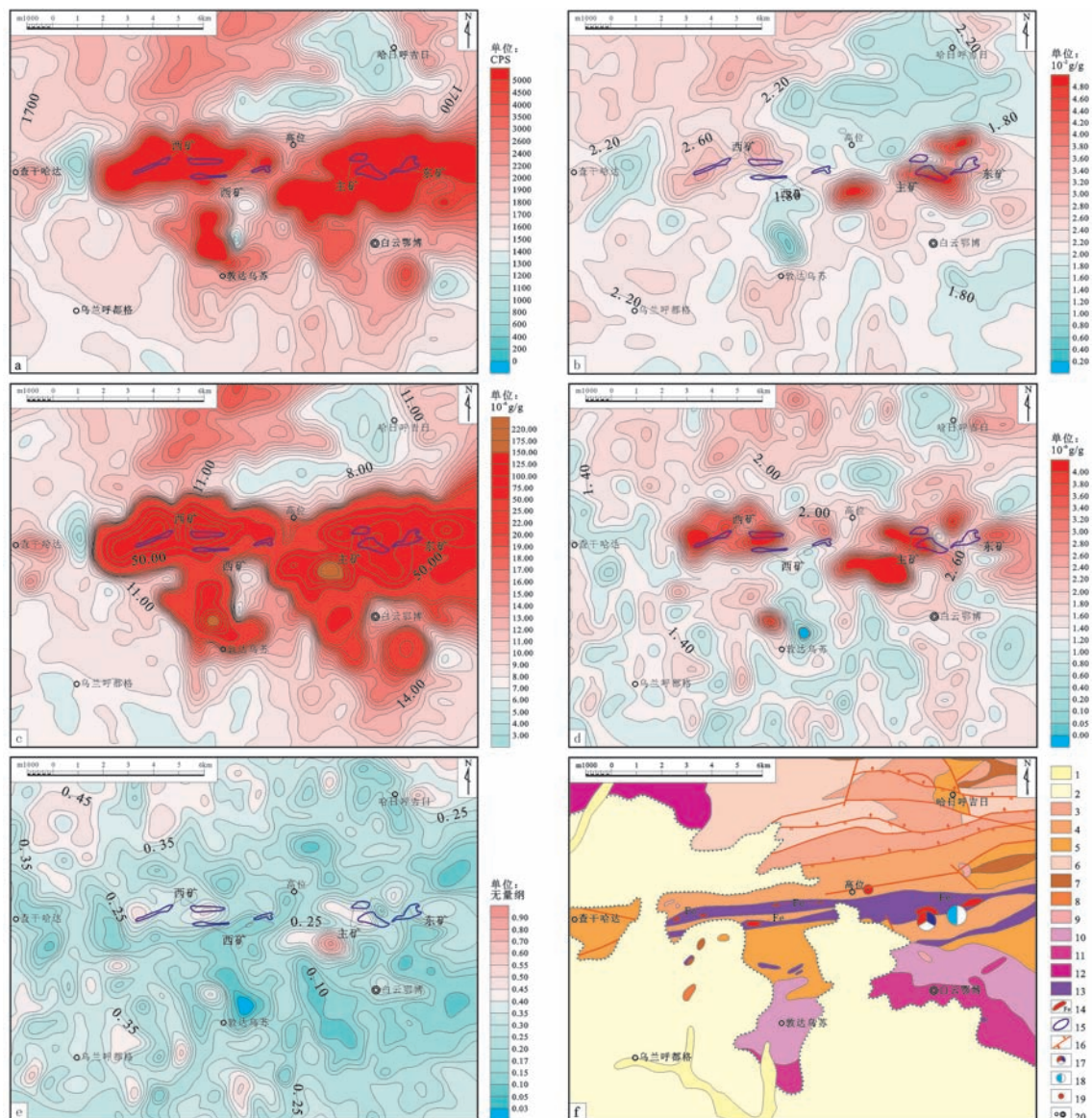


图4 白云鄂博矿矿床航放特征及地质简图

a—计数率等值线平面图; b—钾含量等值线平面图; c—航放钍含量等值线平面图;

d—航放铀含量等值线平面图; e—航放F参数等值线平面图; f—地质简图

1—第四系; 2—古近—新近系; 3—哈拉霍疙特组; 4—尖山组; 5—都拉哈拉组; 6—比鲁特组; 7、8—二叠纪花岗岩; 9—二叠纪闪长岩; 10、11—石炭纪花岗岩; 12—石炭纪花岗闪长岩; 13—碳酸盐岩; 14—铁矿; 15—矿体范围 16—断裂构造; 17—白云鄂博铁铌稀土矿; 18—钽铌矿; 19—铁矿点; 20—城镇居民点

Fig. 4 Aeroradiometric characteristics plans and geological sketch map of the Bayan Obo ore deposit

a—Total count rate contour plan; b—Potassium content contour plan; c—Aeroradiometric thorium content contour plan; d—Aeroradiometric uranium content contour plan; e—Aeroradiometric F parameter contour plan; f—Geological sketch map;

1—Uaternary; 2—Ertiary; 3—Alahuoqite Formation; 4—Jianshan Formation; 5—Dulahala Formation; 6—Bilut Formation; 7,8—Permian granite; 9—Permian diorite; 10,11—Carboniferous granite; 12—Carboniferous granodiorite; 13—Carbonate; 14—Iron ores; 15—Range of orebody; 16—Fault; 17—Bayan Obo REE-Nb-Fe oret; 18—Nb-Ta ore; 19—Iron ore spot; 20—Urban settlements

为 $26 \times 10^{-6} \sim 223 \times 10^{-6}$ 。钍高值晕范围较赋矿的加里东中期第二次侵入的碳酸盐岩(铁、钽、稀土矿的成矿母岩)出露范围大(图4-c); 矿区钍含量多为大于 1.6×10^{-6} 的偏高值, 矿床及附近局部为 $2.8 \times 10^{-6} \sim 9.1 \times$

10^{-6} 的高值, 呈片状东西向排列。铀含量远高于全区平均值 1.20×10^{-6} (图4-d); 白云鄂博矿区上F参数(即 $U \times K/Th$ 值, 下同)值为 $0.06 \sim 0.25$ 的低值, 这主要是白云鄂博矿区上钍元素含量为高值, 相对钾、铀

明显偏高引起;主矿体处 F 参数值为0.25~0.35,略有升高(图4-e)。

7 讨论

经对白云鄂博矿床地质特征与航磁、航放特征对比、分析,发现该矿床的地质、航磁及航放特征对应性明显,指示性较强,对找矿工作具有十分重要的指导意义:

(1)根据对白云鄂博矿床的航磁特征分析,通过航磁信息能够准确地反映由磁性矿物富集直接引起的异常,且特征明显;也可以直接反映由矿床内伴生的磁性矿物间接引起的异常,多金属矿床和一些矿点都有航磁异常反映,而且与铁矿形成的异常特点有所不同;另外能够反映出与岩体侵入蚀变、构造活动等形成的异常。从而也证明了利用航磁方法寻找铁多金属矿是十分可靠的、有效的。

(2)通过对该矿区的航放数据进行分析、研究,可以发现:

①无论从化学性质,还是从空间分布,稀土矿床与钾、铀、钍异常有着十分密切的关系,相似的化学性质是它们伴生的基础,也为我们提供了依靠航放钾、铀、钍等元素异常寻找稀土矿床的理论基础。航放测量结果显示,研究区放射性核素钾、铀、钍含量的均值明显高于其他地区的平均含量,这一特点也充分印证了白云鄂博矿区的稀土矿产资源是十分丰富的地区。同时它们又是亲氧元素,广泛分布于各种岩石和矿物中,并与很多金属元素(如:铜、钼、银、铅、锌、砷、锑、铋等)有着比较稳定的亲合性。在成矿作用过程中及其共同的物理、化学环境条件下,常常共同迁移、富集,甚至形成共、伴生矿床。

②钾、铀、钍元素为活度较大的元素,并常以杂质成分参与多种金属成矿作用的全过程。它们对介质的温度及pH值的变化极为敏感,在地质作用和成矿作用过程中,往往随温度及pH值的变化,放射性元素与多种金属元素产生分离,在金属矿床上形成有规律分布的扩散晕。一般情况下,随着热液pH值和温度由高温—中高温—中低温—低温的逐渐降低,相应形成Th-U-U、Th-U、K-K的规律性分布。

③相同的金属矿床成因类型、介质pH值、介质温度等表征,具有相同的成矿物理、化学环境的放射性特征。因而,局部放射性异常特征(特别是组分

含量比例的变化)是判定找矿物理、化学环境的重要标志。也可以利用放射性元素与其他金属矿物的关系、金属矿物成矿的地质构造环境以及蚀变所反映的放射性信息,间接为多金属找矿服务。

④就岩浆期后热液多金属矿床而言,含矿岩石(特别是含矿蚀变岩石)与不含矿的围岩,其放射性分布特征有着明显的差异。主要表现为:在矿体或近矿蚀变岩中,放射性元素呈有规律的再分布,出现放射性元素的分带性或放射性局部异常的叠加;而在远离矿体的围岩中,放射性元素分布特征维持原样。因此可以根据异常特征来区别含矿蚀变岩与不含矿的围岩。

8 结论

(1)从物性数据分析,基底老变质岩具有一定的磁性,说明在该套岩层内赋存有能够引起磁异常的磁性物质元素。中、新元古代形成了大量碳酸岩的同时,经构造改造运动使成矿元素富集,形成具有磁性较强的矿体,在这个过程中磁性矿物富集使得白云岩发生磁铁矿化和钠闪石化等矿化蚀变现象,同时也是该矿床的主要成矿期,形成的岩(矿)石均具有了较强的磁性,与其伴生的基性岩同样具有较强的磁性。后又经历华力西期岩浆-构造活动,使得具有较弱磁性的岩体侵入、迁移到主矿体部位,但与主矿体成矿无密切关系。结合航磁数据综合分析,表明该矿区磁异常主要由多期次含磁性岩(矿)石经构造热事件改造、叠加作用后共同引起的。

(2)该矿床航磁 ΔT 幅值在5000~-2000 nT,正负磁异常伴生,呈现多期次异常叠加等特征;从航磁 ΔT 化极等值线及上延1000 m(3000 m)等值线平面图分析,可以发现其幅值随上延深度的变化可能有逐渐变小的趋势。向上延拓3000 m时,依然处在较明显的正磁异常中,航磁 ΔT_{\max} 值为1000 nT以上,这说明该矿床在深部依然存在较明显的矿化现象;垂向一阶导数最高值可达11.6 nT、垂向二阶导数最高值可达0.03 nT,最高值出现在靠近主矿体部位,以上航磁特征是找寻铁多金属矿的重要指示信息。

从航磁异常特征及延拓求导结果综合分析,磁化体规模较大,向南西倾。磁异常具有明显的多期次异常叠加特征,属于不同期次、不同强度磁性体的反映,说明该矿床经历过多次构造热事件的叠

加、改造活动,这也与许多学者提出的白云鄂博矿床是以沉积变质成矿作用为主、多种成矿作用叠加的复合成因矿床观点一致,进一步验证了航磁工作对寻找及圈定矿床具有十分重要的意义。

(3)白云鄂博矿区航放特征具有醒目的总计数率、钾、铀、钍高值晕,它们总体上呈近东西向带状展布。矿区处于航放总计数率高值区,一般为3000~15381 cps,局部为团块状,高值区范围大于矿区范围;钾含量为2.0%~2.8%的偏高值,矿床及附近局部为2.8%~12%的高值;钍含量为 26×10^{-6} ~ 223×10^{-6} 。铀含量一般为大于 1.6×10^{-6} 的偏高值,矿床及附近局部为 2.8×10^{-6} ~ 9.1×10^{-6} 的高值。 F 参数值呈现为0.06~0.25的低值,矿床处 F 参数值为0.25~0.35。

研究区航放数据与白云鄂博稀土矿床地质特征对比分析后,发现航放高值区与稀土矿体范围相吻合或略大于矿体范围。白云鄂博矿区上具有醒目的总计数率、钾、铀、钍高值晕,尤其是钍和总计数率极其明显,它们总体上呈近东西向带状展布。总计数率、钾、铀、钍偏高值-高值晕是由白云鄂博铁、铌、稀土矿中富含的放射性元素及加里东中期第二次侵入的碳酸岩类岩石(白云岩等)和被蚀变的围岩引起。稀土矿与放射性核素钾、钍、铀等的关系十分密切,成矿热液中富氟和钠,携带大量稀土、铌、钽、铁、锰、钡等金属离子,这与稀土元素的地球化学性质有关,是引起航磁、航放异常的主要原因。由此证明可以将航放核素钾、钍、铀等高值信息做为寻找稀土矿有利信息。

综上所述,通过对白云鄂博REE-Nb-Fe矿所获得的航空综合站测量的数据进行分析、对比及综合研究,发现利用航磁、航放测量手段作为找矿的辅助手段是可行的、有效的。利用航空测量手段对于地表露头较差的地区(或覆盖区)开展找矿工作,可以有效、准确地圈定找矿靶区,进一步对矿床规模、范围的控制起到指导作用。避免工程布置的盲目性,进而提高工作效率、缩小工作成本。参考本文所总结的该类型矿床的航磁、航放特征与矿床地质特征的对应关系,对寻找到类似矿床具有十分重要的指导意义。

致谢: 本文得到了内蒙古地质调查院教授级高工武利文、郑宝军等提出的宝贵建议,审稿专家和编辑部杨艳老师对论文提出了宝贵修改意见,在此

一并致以诚挚的谢意!

参考文献(References):

- [1] 张培善,陶克捷,杨主明,等.白云鄂博稀土、铌钽矿物及其成因探讨[J].中国稀土学报,2001,19(2):97-102.
Zhang Peishan, Tao Kejie, Yang Zhuming, et al. Genesis of rare earths, niobium and tantalum minerals in Bayan Obo ore deposit of China[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2001, 19(2): 97-102 (in Chinese with English abstract).
- [2] 赖小东,杨晓勇,柳建勇.白云鄂博Fe-REE-Nb建造地球化学特征及成因:元素及同位素新证据[J].地质学报,2012,85(5):801-818.
Lai Xingdong, Yang Xingyong, Liu Jianyong. Geochemical features and its genesis of the Bayan Obo Fe-REE-Nb formation: New evidence from elements and isotopes[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 85(5): 801-818 (in Chinese with English abstract).
- [3] 肖荣阁,费红彩,安国英,等.内蒙古白云鄂博矿区白云岩岩石学及其成因研究[J].现代地质,2003,17:287-303.
Xiao Rongge, Fei Hongcai, An Guoying, et al. Lithology and genesis of dolomite in Baiyun Ebo mine, Inner Mongolia[J]. Geoscience, 2003, 17: 287-303 (in Chinese with English abstract).
- [4] 李厚民,王登红,李立兴,等.中国铁矿成矿规律及重点矿集区资源潜力分析[J].中国地质,2012,39(3):559-580.
Li Houmin, Wang Denghong, Li Lixing, et al. Metallogeny of iron deposits and resource potential of major iron minerogenetic units in China[J]. Geology in China, 2012, 39(3): 559-580(in Chinese with English abstract).
- [5] 张峰,刘铁庚,张凤祥.裂变径迹法研究白云鄂博东矿的成矿时代及热历史[J].自然科学进展,1997,7(2):202-206.
Zhang Feng, Liu Tiegeng, Zhang Fengxiang. Study on the metallogenic epoch of fission track method in Baiyunebo East Mine and thermal history[J]. Progress in Natural Science, 1997, 7(2): 202-206 (in Chinese with English abstract).
- [6] 章雨旭,江少卿,张绮玲.论内蒙古白云鄂博群和白云鄂博超大型稀土-铌-铁矿床成矿的年代[J].中国地质,2008,35(6):1129-1137.
Zhang Yuxu, Jiang Shaoqing, Zhang Qiling, et al. A discussion on forming time of the Bayan Obo Group and ore-forming time of the Bayan Obo giant REE-Nb-Fe deposit, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 2008, 35(6): 1129-1137(in Chinese with English abstract).
- [7] 范宏瑞,陈福坤,王凯怡,等.白云鄂博REE-Fe-Nb矿床碳酸岩墙锆石U-Pb年龄及其地质意义[J].岩石学报,2002,18(3):363-368.
Fan Hongrui, Chen Fukun, Wang Kaiyi, et al. Zircon U-Pb age of a carbonatite dyke from Bayan Obo REE-Fe-Nb deposit, Inner Mongolia and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18(3): 363-368 (in Chinese with English abstract).
- [8] 范宏瑞,胡芳芳,陈福坤,等.白云鄂博超大型REE-Nb-Fe矿区碳酸岩墙的侵位年龄[J].岩石学报,2006,22(2):519-520.
Fan Hongrui, Hu Fangfang, Chen Fukun, et al. Intrusive age of carbonatite dyke from Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit, Inner

- Mongolia: With answers to comment of Dr. Le Bas [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(2): 519-520 (in Chinese with English abstract).
- [9] 刘玉龙, 陈江峰, 李惠民, 等. 白云鄂博矿床白云石型矿石中独居石单颗粒 U-Th-Pb-Sm-Nd 定年[J]. *岩石学报*, 2005, 21(3): 881-888.
Liu Yulong, Chen Jiangfeng, Li Huimin, et al. Single grain U-Th-Pb-Sm-Nd dating of monazite from dolomite type ore of the Bayan Obo deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(3): 881-888 (in Chinese with English abstract).
- [10] 刘玉龙, 杨刚, 陈江峰, 等. 白云鄂博超大型稀土-铌-铁矿床黄铁矿 Re-Os 定年[J]. *科学通报*, 2005, 50(2): 172-175.
Liu Yulong, Yang Gang, Chen Jiangfeng, et al. Re-Os Dating of the pyrite in Bayan Obo Nb-REE-Fe ore deposit[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(2): 172-175 (in Chinese with English abstract).
- [11] 刘玉龙, 陈江峰, 李惠民, 等. 白云鄂博矿田碳酸岩墙年代学再研究[J]. *地质论评*, 2006, 52(3): 415-422.
Liu Yulong, Chen Jiangfeng, Li Huimin, et al. Geochronology of the carbonatite dykes in the Bayan Obo orefield: Revisit [J]. *Geological Review*, 2006, 52(3): 415-422 (in Chinese with English abstract).
- [12] 张宗清, 叶笑江, 袁忠信, 等. 白云鄂博稀土矿床的形成年代: Sm-Nd 同位素数据[J]. *岩石矿物学杂志*, 1991, 10(1): 80-83.
Zhang Zongqing, Ye Xiaojiang, Yuan Zhongxin, et al. Age of the Baiyun Obo Nb-REE-Fe deposits in Inner Mongolia: the Sm-Nd isotopic data[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1991, 10(1): 80-83 (in Chinese with English abstract).
- [13] 张宗清, 唐索寒, 王进辉, 等. 白云鄂博稀土矿床形成年龄的新数据[J]. *地球学报*, 1994, 15(1/2): 85-93.
Zhang Zongqing, Tang Suohan, Wang Jinhu, et al. New data for ore-forming age of the Bayan Obo REE deposit, Inner Mongolia[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1994, 15(1/2): 85-93 (in Chinese with English abstract).
- [14] 任英忱, 张英臣, 张宗清. 白云鄂博稀土超大型矿床的成矿时代及其主要地质热事件[J]. *地球学报*, 1994, (1/2): 95-101.
Ren Yingchen, Zhang Yingchen, Zhang Zongqing. Study on heatevents of ore-forming Bayan Obo deposit[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1994, (1/2): 95-101 (in Chinese with English abstract).
- [15] 刘兰笙, 高翎, 杜安道, 等. 白云鄂博稀土矿床中辉钨矿的铼-钨同位素年龄[J]. *矿床地质*, 1996, 15(2): 188-192.
Liu Lanshen, Gao Ling, Du Andao, et al. The Re-Os isotopic age of molybdenite from the Bayan Obo REE ore deposits [J]. *Mineral Deposits*, 1996, 15(2): 188-192 (in Chinese with English abstract).
- [16] 裴荣富, 梅燕雄, 瞿泓滢, 等. 矿床类型模型的地质构造背景、成矿环境和容矿岩石组合[J]. *中国地质*, 2013, 40(1): 31-42.
Pei Rongfu, Mei Yanxiong, Qu Hongying, et al. Geological tectonic settings, depositional environments and ore-hosting rock assemblages for mineral deposits model with universality[J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 31-42(in Chinese with English abstract).
- [17] 章雨旭, 吕洪波, 王俊, 等. 白云鄂博矿床成矿构造环境分析[J]. *地质学报*, 2012, 86(5): 767-774.
Zhang Yuxu, Lv Hongbo, Wang Jun, et al. Analysis of ore-forming tectonic settings of the bayan obo REE deposit[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(5): 767-774(in Chinese with English abstract).
- [18] 范宏瑞, 杨奎锋, 胡芳芳, 等. 内蒙古白云鄂博地区基底岩石锆石年代学及对构造背景的指示[J]. *岩石学报*, 2010, 26(5): 1342-1350.
Fan Hongrui, Yang Kuifeng, Hu Fangfang, et al. Zircon geochronology of basement rocks from the Bayan Obo area, Inner Mongolia and tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(5): 1342-1350 (in Chinese with English abstract).
- [19] 杨学明, 杨晓勇, 张培善, 等. 白云鄂博REE-Nb-Fe 矿床成因的氧、碳和铈及微量元素地球化学证据[J]. *矿床地质*, 1998, 41(增刊): 216-227.
Yang Xuemin, Yang Xiaoyong, Zhang Peishan, et al. Rare-earth element enriched carbonatite dykes in the Bayan Obo area: the geochemical characteristics and the mechanism for REE enrichment[J]. *Mineral Deposits*, 1998, 41(Sup.): 216-227 (in Chinese with English abstract).
- [20] 杨学明, 杨晓勇, 陈天虎, 等. 白云鄂博富稀土碳酸岩的地球化学特征[J]. *中国稀土学报*, 1999, 17(4): 289-295.
Yang Xueming, Yang Xiaoyong, Chen Tianhu, et al. Geochemical characteristics of a carbonatite dyke rich in rare earths from Bayan Obo, China[J]. *Journal of The Chinese Rare Earths Society*, 1999, 17(4): 289-295 (in Chinese with English abstract).
- [21] 舒勇, 郑永飞, 魏春生, 等. 白云鄂博碳酸岩墙碳氧同位素地球化学[J]. *地球化学*, 2001, 30(2): 169-176.
Shu Yong, Zheng Yongfei, Wei Chunsheng, et al. Carbon and oxygen isotope geochemistry of carbonatite dykes from Bayan Obo, Inner Mongolia[J]. *Geochimica*, 2001, 30(2): 169-176 (in Chinese with English abstract).
- [22] 李江海, 牛向龙, 程素华, 等. 大陆克拉通早期构造演化历史探讨: 以华北为例[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2006, 31(3): 285-293.
Li Jianghai, Niu Xianglong, Cheng Suhua, et al. The Early Precambrian tectonic evolution of continental Craton: A case study from North China[J]. *Earth Science——Journal of China University of Geosciences*, 2006, 31(3): 285-293 (in Chinese with English abstract).
- [23] 王凯怡, 范宏瑞, 谢奕汉, 等. 白云鄂博超大型REE-Fe-Nb 矿床基底杂岩的锆石 U-Pb 年龄[J]. *科学通报*, 2001, 46(16): 1390-1394.
Wang Kaiyi, Fan Hongrui, Xie Yihan, et al. Zircon U-Pb dating of bas element gneisses of the super-large REE-Fe-Nb deposit in the Bayan Obo region, Inner Mongolia[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 46(16): 1390-1394 (in Chinese).
- [24] 杨奎锋. 内蒙古白云鄂博地区元古代构造-岩浆演化与超大型REE-Nb-Fe 矿床成因[D]. 中国科学院地质与地球物理研究所, 2008.
Yang Kuifeng. Bayan Obo Area Inner Mongolia Proterozoic Tectono Magmatic Evolution and Super Large REE-Nb-Fe

- Genesis(Ph.D thesis) [D]. China Science Institute of Geology and Geophysics, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [25] 毛景文, 张作衡, 裴荣富. 中国矿床模型概论[M]. 北京: 地质出版社, 2012: 349-354.
Mao Jingwen, Zhang Zuoheng, Pei Rongfu. Introduction of Deposit Model in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012: 349-354 (in Chinese with English abstract).
- [26] 张培善, 陶克捷, 杨主明, 等. 白云鄂博稀土、铌钽矿物及其成因探讨[J]. 中国稀土学报, 2001, 19(2): 97-102.
Zhang Peishan, Tao Kejie, Yang Zhuming, et al. Genesis of rare earths, niobium and tantalum minerals in Bayan Obo ore deposit of China[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2001, 19(2): 97-102 (in Chinese with English abstract).
- [27] 刘健, 等. 白云鄂博矿床基底岩石的年代学研究及其地质意义[J]. 地球化学, 2011, 40(3): 209-222.
Liu Jian, et al. Chronology and geological significance of the basement rock of the giant Bayan Obo REE-Nb-Fe ore deposit[J]. Geochimica, 2011, 40(3): 209-222 (in Chinese with English abstract).
- [28] Nakai S, Masuda A, Shimizu H, et al. La-Ba dating and Nd and Sr isotope studies on Bayan Obo rare earth element ore deposit, Inner Mongolia, China[J]. Economic Geology, 1989, 84: 2296-2299.
- [29] 范宏瑞, 胡芳芳, 杨奎锋, 等. 白云鄂博超大型稀土-铌-铁矿床成矿过程中的流体不混溶作用[J]. 矿床地质, 2006, 25: 163-166.
Fan Hongrui, Hu Fangfang, Yang Kuifeng, et al. Fluid immiscibility as an ore-forming process in the superlarge REE-Nb-Fe deposit, Inner Mongolian, China[J]. Mineral Deposits, 2006, 25: 163-166 (in Chinese with English abstract).
- [30] Le Bas M J, Yang X M, Taylor R N, et al. New evidence from a calcite-dolomite carbonate dyke for the magmatic origin of the massive Bayan Obo ore-bearing dolomite marble, Inner Mongolia, China[J]. Mineralogy and Petrology, 2007, 91(3/4): 281-307.
- [31] 张宗清, 唐索寒, 袁忠信, 等. 白云鄂博矿床白云岩的Sm-Nd、Rb-Sr同位素体系[J]. 岩石学报, 2001, 17(4): 637-642.
Zhang Zongqing, Tang Suohan, Yuan Zhongxin, et al. The Sm-Nd and Rb-Sr isotopic systems of the dolomites in the Bayan Obo ore deposit, Inner Mongolia, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(4): 637-642 (in Chinese with English abstract).
- [32] 张宗清, 袁忠信, 唐索寒, 等. 白云鄂博矿床年龄和地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 1-222.
Zhang Zongqing, Yuan Zhongxin, Tang Suohan, et al. Age and Geochemistry of the Bayan Obo Ore Deposit[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 1-222 (in Chinese with English abstract).
- [33] 张宗清, 唐索寒, 王进辉, 等. 白云鄂博矿床形成于不同时代的信息——矿床西矿体的年龄和讨论[J]. 中国地质, 2003, 30(2): 130-137.
Zhang Zongqing, Tang Suohan, Wang Jinhui, et al. Information about ore deposit formation in different epochs: Age of the west orebodies of the Bayan Obo deposit with a discussion[J]. Geology in China, 2003, 30(2): 130-137(in Chinese with English abstract).
- [34] 裴榆卓. 白云鄂博独居石 SHRIMP 定年的思考[J]. 地球学报, 1997, 18(增刊): 211-213.
Qiu Yuzhuo. Thought on SHRIMP dating of Bayan Obo monazite[J]. Acta Geoscientia Sinica, 1997, 18(Supp.): 211-213 (in Chinese with English abstract).
- [35] 白鸽, 袁忠信. 白云鄂博矿床地质特征和成因讨论[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1-104.
Bai Ge, Yuan Zhongxin. Demonstration on the Geological Features and Genesis of the Bayan Obo Ore Deposit[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 1-104 (in Chinese with English abstract).
- [36] 肖荣阁, 刘敬党, 费红彩, 等. 白云鄂博REE-Nb-Fe矿床的富钠岩石类型及成因分析[J]. 现代地质, 2006, 20(1): 151-164.
Xiao Rongge, Liu Jingdang, Fei Hongcai, et al. Types and genesis of Na-rich rocks in the Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit, Inner Mongolia, China[J]. Geoscience, 2006, 20(1): 151-164 (in Chinese with English abstract).
- [37] 翟裕生, 邓军, 汤中立, 等. 古陆边缘成矿系统[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
Zhai Yusheng, Deng Jun, Tang Zhongli, et al. Metallogenic System of Continental Margin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002(in Chinese with English abstract).
- [38] 翟裕生. 论成矿系统[J]. 地学前缘, 1999, 6(1): 14-28.
Zhai Yushen. On The Metallogenic System[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(1): 14-28(in Chinese with English abstract).
- [39] 翟裕生, 邓军, 李晓波. 区域成矿学[M]. 北京: 地质出版社, 1999: 1-287.
Zhai Yusheng, Deng Jun, Li Xiaobo. Regional Metallogeny[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 1-287 (in Chinese with English abstract).
- [40] 翟裕生. 中国区域成矿特征及若干值得重视的成矿环境[J]. 中国地质, 2003, 30(4): 337-342.
Zhai Yusheng. Regional metallogenic features and some important ore-forming environments of China[J]. Geology in China, 2003, 30(4): 337-342(in Chinese with English abstract).