



白云鄂博矿区深边部铁矿床勘查突破及启示*

李以科¹, 柯昌辉¹, 王登红¹, 赵永岗², 余宏全¹, 李瑞萍¹, 郝美珍², 王安建¹, 邓震³,
高玉璞², 张强⁴, 张丽², 李进文¹, 胡古月¹, 刘云⁴, 郭宾², 苑星宇²

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2 包钢(集团)公司白云鄂博铁矿, 内蒙古 包头 014080; 3 中国地质科学院, 北京 100037; 4 包钢勘察测绘研究院, 内蒙古 包头 014080)

摘要 围绕白云鄂博矿山寻找铁矿接替资源的迫切需求, 聚焦构造对深部矿体控制作用, 开展复杂地形及强干扰地区重力-磁法-电法-高精度反射地震综合勘查示范研究。通过一系列专题地质填图和综合研究, 笔者构建了白云鄂博矿床成矿模式和新的勘查模型, 提出矿区近东西向逆-平移断层(F_2)导致了主矿、东矿深部矿体向东平移的新认识, 明确指出深部存在受构造控制的铁矿体, 并圈定了找矿靶区3处。通过钻探验证实现了铁矿找矿突破, 目前在2号靶区已施工的15个钻孔全部见矿, 钻孔控制最大铁矿层累计视厚度达327.2 m。靶区深部厚大铁矿体的发现, 是科研指导勘查, 降低勘查风险, 提高找矿效率的典型实践, 大幅度提升了白云鄂博资源保障能力, 有效促进了科研成果的及时转化。

关键词 地质学; 战略性矿产资源; 矿床勘查模型; 综合勘查; 铁矿; 白云鄂博
中图分类号: P618.31 文献标志码: A

Important progress in prospecting and exploration of iron ore in deep border area of Bayan Obo deposit, Inner Mongolia, China

LI YiKe¹, KE ChangHui¹, WANG DengHong¹, ZHAO YongGang², SHE HongQuan¹, LI RuiPing¹, HAO MeiZhen²,
WANG AnJian¹, DENG Zheng³, GAO YuPu², ZHANG Qiang⁴, ZHANG Li², LI JinWen¹, HU GuYue¹, LIU Yun⁴,
GUO Bin² and YU AN XingYu²

(1 MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 Bayan Obo Iron Mine, Baotou Iron and Steel Company, Baotou 014080, Inner Mongolia, China; 3 Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4 Institute of Surveying and Mapping of Baotou Steel Group Co. Ltd., Baotou 014080, Inner Mongolia, China)

Abstract

In order to meet the needs of reserved iron resources, an integrated of gravity-magnetic-electric-reflection seismic comprehensive exploration has been carried out in the complex and strongly interfered mining district of Bayan Obo. Based on building the 3D metallogenic and exploration model, we proposed that the deep iron ore-body was controlled by the nearly EW-trending strike-slip fault (F_2) and clearly pointed out three exploration targets that the blind iron ore-bodies in Bayan Obo deposit may hidden in the eastern domain of main ore-body. Via drilling verification, fifteen drill holes in the No. 2 exploration target were completely show intersected iron ores, with the maximum cumulative value of apparent thickness iron ore reached to 327.2 m. The discovery of thick ore-bodies in the prospecting target of Bayan Obo deposit was a typical case that the scientific research can guide ore prospecting work, and reducing exploration risk. Our work not only dramatically lifted the resource guarantee in Bayan Obo

* 本文得到国家自然科学基金(编号:42072114), 科技成果转化项目(编号:HE1922、HE1918)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(编号:KK1916)联合资助

第一作者简介 李以科,男,1983年生,高级工程师,矿物学、岩石学、矿床学专业。Email:like430@cags.ac.cn

mining district, but also accomplished the desired goals of economic geology that exploration guided by innovation.

Keywords: geology, strategic mineral resources, exploration model, comprehensive prospecting, iron deposit, Bayan Obo

白云鄂博多金属矿床是全球最大的稀土矿床(谢玉玲等,2019),同时是超大型铁矿床,伴生有铌、钽、铈、萤石等多种战略性关键矿产资源,其供应了全球40%以上的稀土资源需求(杨占峰,2020),也是包头钢铁(集团)有限责任公司铁矿石主要原料生产基地。主矿、东矿是白云鄂博矿区最大的2个铁矿体,占据了90%以上的铁资源量,二者相距500余米(图1),均进入露天开采晚期阶段。截至目前,东矿开采标高分别为海拔1275 m,开采境界内(海拔1230 m)剩余铁矿石资源储量1150万吨,按300万吨/年产能,仅可以维持3~4年。主矿开采标高1374 m,距离设计边界(1230 m)也仅有5~8年的开采时间。由此可见,寻找深边部接替资源,保障矿山发展迫在眉睫。

白云鄂博多金属矿床主矿、东矿之间500 m区域是深部找矿第一目标区域,但两者之间是否具有找矿前景一直存在较大争议。早在1950~1954年,地质部241地质勘探大队为了追索矿体延伸情况,在主矿、东矿之间部署了少量槽探和钻探工作,以及磁法和电测深工作,结果认为主矿、东矿在地表和深部不相连,主矿体东端和东矿体西端自然尖灭,不是断层导致(中华人民共和国地质部241地质勘探队,1954);1958~1959年,中苏合作地质队(1959)研究认为主矿、东矿之间存在断层导致深部矿体不相连,主矿、东矿之间没有铁矿体存在;1959~1963年,白云铁矿地质队发现东矿体西端有变厚和向西隐伏延展的可能性,指出需要进一步研究主矿、东矿之间的成矿潜力(转引自包钢541地质勘探队,1964);1964~1965年,包钢541地质勘探队为了查明主矿、东矿之间成矿潜力,通过钻探验证工作(CK14-1-1、CK14-1-2、CK14-E-1,累计钻探进尺806.59 m),在主矿、东矿之间探明10余个小型铁矿体,估算资源储量仅59万吨,成果报告明确指出主矿、东铁矿体无论地表还是地下均不相连,矿体由于成矿作用自然尖灭,二者之间不存在断层,否定了前人的认识。根据包钢541地质勘探队(1964)研究结果,矿山设计单位确定了主矿、东矿2个矿体独立开采的方案。自此,主矿、东矿之间无矿的观点一直影响至今。

然而,随着露天开采不断揭露出新的地质证据(柯昌辉等,2021),最新东矿深部勘查结果显示(包

钢勘察测绘研究院,2016),主矿、东矿之间的相互关系仍存在以下几个矛盾无法解释:①成矿作用自然尖灭处的矿体矿石品位一般较低,规模较小,然而目前采场揭露发现,东矿体最西端和主矿体最东端的矿体均为块状富矿石(Fe品位可达到45%~60%);②主矿14号勘探线与东矿15号勘探在矿体延伸方向上,在海拔1200 m和900 m处矿体突然加厚,与推断的自然尖灭情况明显不符,且导致矿体突然加厚的原因不清楚(柯昌辉等,2021);③主矿、东矿体以及之间的白云石碳酸岩在极短的距离(500 m)发生了突变,特别是东矿15~18线,在海拔1300~800 m处,突然出现厚层白云岩碳酸岩(包钢勘察测绘研究院,2016),与地质体正常延伸存在明显矛盾,可能存在断层构造导致地质体发生错动;④通过矿区1:5000地质填图发现,顶板围岩地层走向在主矿、东矿之间沿走向中断,具有明显的断层切割的现象(中国地质科学院矿产资源研究所,2021)。

综上所述,主矿、东矿之间是否存在断层,其相互关系仍然存在较大争论。如果存在断层构造,其对深部矿体控制作用如何?特别是在主矿、东矿深部和南侧,是否存在隐伏的铁矿体?显然,这些都是白云鄂博铁矿深、边部勘探工作首先要回答的问题。

为了查明白云鄂博主矿、东矿之间成矿潜力,实现接替资源找矿突破。2019~2021年,笔者及研究团队在白云鄂博矿区开展了矿床成矿作用、矿田构造、综合地球物理探测及铁矿找矿靶区预测研究工作,主要包括:更新白云鄂博矿集区85 km²的1:10 000大比例尺地质图件,主东矿区12 km²的1:5000岩石构造专题图件;完成主、东矿区1:10 000重、磁、电、震立体综合勘查,累计完成重磁测量4563点,电磁测深287点,岩石物性标本660块,处理深反射地震剖面14 km,二次处理以往重力、磁法数据580 km²,此外,还开展了岩芯编录、构造专题研究等综合研究工作。通过3年的勘查研究和钻探验证工作,研究团队找矿成果突出,构建了成矿模式和综合勘查模型。

1 成矿模式和综合勘查模型

通过开展白云鄂博矿集区1:10 000矿产地质

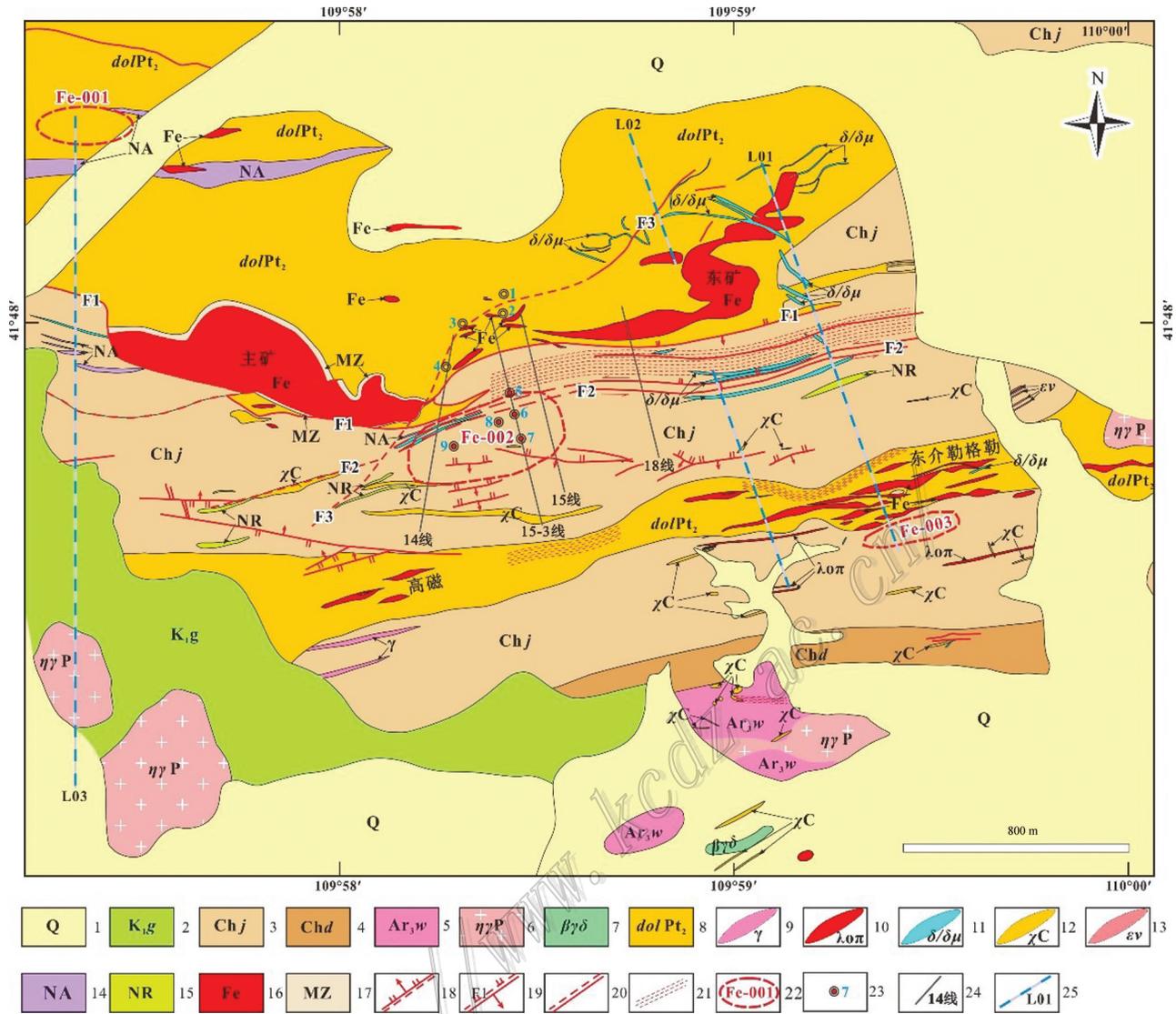


图1 白云鄂博主、东矿区地质与构造分布图及物探工作部署(其中重力、磁法调查覆盖全区)

1—第四系;2—白垩系固阳组;3—长城系尖山组;4—长城系都拉哈拉组;5—新太古界乌拉山群;6—二叠纪二长花岗岩;7—黑云母花岗岩闪长岩;8—中元古代白云石碳酸岩;9—花岗岩脉;10—石英斑岩脉;11—闪长岩/闪长玢岩脉;12—碳酸岩脉;13—碱性岩脉;14—钠角闪石岩脉;15—钠辉石钠角闪石碱性岩脉;16—铁矿化体;17—低品位铁矿化带;18—实测或推测正断层;19—实测或推测逆断层及编号;20—实测或推测性质不明断层;21—韧性剪切带;22—铁矿靶区及编号;23—钻孔号及编号;1964年勘探钻孔:1-CK14-1-2;2-CK14-1-1;3-ZK14-E-1;4-CK15-9,本次验证钻孔:5-TK15-03-02;6-TK15-03-01;7-TK15-03-03;8-KY15-03F-01;9-KY15-04-01;24—勘探线及编号;25—电磁测深剖面

Fig.1 Geological and structural distribution map of the main and east section in the Bayan Obo ore deposit contains the field work arrangement of geophysical

1—Quaternary; 2—Cretaceous Guyang Formation; 3—Jianshan Formation; 4—Dulahara Formation; 5—Neoarchean Wula Mountain Group; 6—Permian monzogranites; 7—Biotite granodiorite; 8—Mesoproterozoic dolomite carbonate; 9—Granite dyke; 10—Quartz porphyry dyke; 11—Diorite/diorite porphyrite dyke; 12—Carbonatite dyke; 13—Alkaline dyke; 14—Riebeckite dyke; 15—Aegirine and riebeckite alkaline dyke; 16—Iron ore body; 17—Low-grade iron mineralization zone; 18—Measured or inferred normal faults; 19—Measured or inferred reverse faults and its number; 20—Measured or inferred unknown faults and its number; 21—Ductile shear zone; 22—Iron prospecting target area; 23—Drill hole and its number, the drill hole of 1964: 1-CK14-1-2; 2-CK14-1-1; 3-ZK14-E-1; 4-CK15-9; the drill hole of this project: 5-TK15-03-02; 6-TK15-03-01; 7-TK15-03-03; 8-KY15-03F-01; 9-KY15-04-01; 24—Prospecting line and its number; 25—Electromagnetic depth sounding profile

专题图件、主、东矿区 1:5000 的岩性构造专题图件(图 1)和主矿、东矿区岩浆热液蚀变图件等填(编)图工作,结合综合研究,认为白云鄂博特大型

铁稀土矿床形成主要与碳酸岩岩浆作用有关,碳酸岩与围岩发生强烈而广泛的接触交代作用和热接触变质作用,矿体外围的钠长石化、黑云母化、

富钾板岩和变质石英岩全部是霓长岩化和热接触变质产物,构成碳酸岩体外围的霓长岩和角岩化蚀变带。主矿、东矿体外围发育宽广的钠长石化带是最强烈的霓长岩化蚀变结果。富含稀土元素的岩浆冷却结晶形成了白云质碳酸岩体内部的低品位稀土矿床,碳酸岩岩浆演化形成的富含铁、氟和稀土元素的成矿热液引起的交代和充填作用形成了矿区的高品位块状铁矿型和霓长岩型钕铁稀土矿石,岩浆与热液过渡态流体与围岩的交代作用是稀土、铁等元素成矿关键机制。研究团队提出了白云鄂博矿床属于与碳酸岩岩浆作用有关的岩浆型+高温热液交代型(霓长岩型)矿床的新认识(余宏全等,待刊),为深部找矿模型建立提供了理论支撑。

研究团队首次在白云鄂博矿集区开展专题地质填图-反射地震-重力-磁法-电法综合勘查技术方法示范,通过专题构造填图提出矿区近东西向逆-平移断层(F_2)导致了主矿、东矿深部矿体向东平移的新认识,且明确指出主矿、东矿深部存在受构造控制的铁矿体(图2)。利用三维正演的方式精确地消除了人文干扰源(数百米高的矿渣堆)在重力地形改正过程中带来的密度不均一问题,开展重磁联合反演建模,透视主东矿区深部结构,定位深部矿体空间位置。此外,笔者修正了1954年以来沉积变质型控矿的勘查模型,提出了构造控制的接触交代型矿床模型(图2),预测3处铁矿找矿靶区(图1),有效支撑了矿区深边部勘查工作的部署。

2 靶区验证与找矿突破

围绕研究提出的找矿靶区,包头钢铁(集团)有限责任公司设计了48个钻孔开展钻探验证。在主矿、东矿之间的2号找矿靶区(Fe-002)部署了钻探验证工作(图1),目前已完成的15个钻孔全部见矿,其中,TK15-03-03 累计见矿厚度 327.2 m,铁矿品位 20%~30%;TK15-03-01 累计见矿厚度 254.2 m,品位 25%~30%;TK15-03-02 累计见矿厚度 130 m,品位 25%~35%。钻探结果近期的深钻表明,主矿 14 勘探线和东矿 15 勘探线、15-03 勘探线深部的矿体均变厚,且 14 线向东、15 线向西,矿体均未封闭,资源潜力非常可观。

3 启示意义

从目前工作进展看,尽管深部矿体空间展布和资源储量探明还需要大量的钻探控制,但白云鄂博

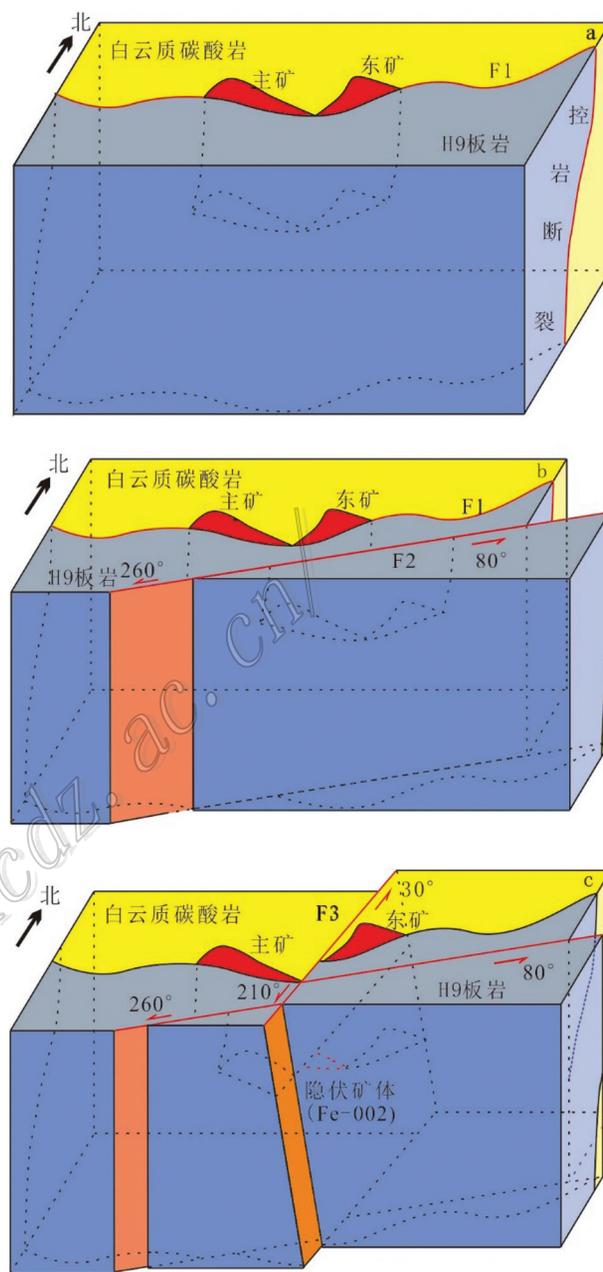


图2 白云鄂博矿区深部矿体构造控制模型示意图
a. 主矿、东矿铁矿体形成时期;b. 铁矿形成后的近东西向逆-平移断裂构造作用;c. 北西向左行正断层构造作用

Fig. 2 Schematic diagram of structure control model of deep orebody in Bayan Obo mining area

- a. The formation period of the East and Main Iron ore body; b. The nearly EW-trending strike-slip fault (F_2) after the iron orebody; c. NW-trending left-lateral normal faults (F_3) after F_2

铁矿深部找矿勘查工作初步取得了预期成果,以下几点经验值得总结:

(1) 对矿床成因研究的认识不同,需要提出合理的勘查模型,进而为找矿工作服务。自1950年以

来,白云鄂博矿床勘查一直以沉积-变质-热液改造向斜控矿模型为指导(杨占峰,2020),本次研究基于大量地质研究,提出白云鄂博铁矿是与岩浆碳酸岩侵入接触交代型矿床的不同认识,找矿标志从控矿地层调整为岩浆碳酸岩与围岩接触带以及控矿构造,建立了白云鄂博主矿、东矿深部矿体构造模型,钻探验证初步证实了模型合理性。

(2) 主矿、东矿之间深部隐伏铁矿体的发现,破解了1959年、1964年不同研究单位多次提出的主矿、东矿相关性关键疑难问题,打破了深部矿体不相连的传统认识,对于外围铁矿找矿远景区预测也具有一定指导意义。根据构造和接触带控制矿体产出的规律,笔者提出东介勒格勒矿体深部可能向南倾的认识,预测了第3号找矿靶区(Fe-003)(图1)。

(3) 预测靶区深部厚大铁矿体的发现,是科研指导勘查,降低勘查风险,提高找矿效率的典型实践。通过进一步勘查工作,必将提升了白云鄂博资源保障能力,有效促进了科研成果的及时转化。

致谢 工作中得到中国工程院陈毓川院士、毛景文院士,中国地质调查局李朋德副局长,资源评价部韩志军副主任,包头钢铁(集团)有限责任公司孙国龙总经理、刘振刚副总经理、王臣部长、武凤茹工程师,内蒙古包钢钢联股份有限公司李晓总经理等专家领导的技术指导;包头稀土研究院杨占峰院长、刘建军副院长的技术支持和交流;中国地质科学院深部探测中心孟贵祥研究员的地球物理综合勘查方面的技术指导;中国地质科学院矿产资源研究所李厚民研究员、唐菊兴研究员、王晓霞研究员、杨岳清研究员在矿床成因研究方面的交流指导;吉林大学徐仲元教授、刘正宏教授和董晓杰讲师在构造研究方面的支持;包钢勘察测绘研究院翟华伟院长、王武、赵利斌、宿泽江等工程师有益交流和资料共享。在西矿区开展工作得到刘占全总经理、崔凤总工程师、赵剑工程师的支持,野外工作期间参与工作的矿山技术人员辛苦付出。中国地质科学院矿产资源研究所包钢白云鄂博科学研究基地是本次工作得以顺利开展的重要研究平台,科学基地的成立得到资源所陈仁义所长、李剑书记、原党委书记傅秉峰研究员及各职能部门领导大力支持,在此一并表示感谢。

References

- Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences. 2021. The geophysical detection report of the correlation of the Banyan Obo main and east orebodies[R](in Chinese).
- Institute of Surveying and Mapping of Baotou Steel Group Co. LTD. 2016. The geological survey report of the deep and edge of the east orebody of the Banyan Obo deposit, Inner Mongolia[R].(in Chinese).
- Ke C H, Sun S, Zhao Y G, Li Y K, Xu Z Y, Hao M Z, Li R P and Zhang L. 2021. Ore controlling structure and deep prospecting of the Bayan Obo large-size REE-Nb-Fe ore deposit, Inner Mongolia[R]. Geological Bulletin of China, 40(1): 95-109(in Chinese with English abstract).
- No. 241 Geological Brigade of Ministry of Geology, PRC. 1954. The geological exploration report of main and east deposit of Bayan Obo iron mine[R]. 34p (in Chinese).
- No. 541 Geological Brigade of Baotou Steel Group Co. LTD. 1964. The geological exploration report of the area between the main and east orebodies[R]. 5-8,31(in Chinese).
- Sino-Soviet Geological Cooperation Team. 1959. The summary report on the study of the Bayan Obo Fe-F-REE and rare elements deposit[R]. 82p(in Chinese).
- Xie Y L, Qu Y W, Yang Z F, Liang P, Zhong R C, Wang Q W, Xia J M and Li B C. 2019. Giant Bayan Obo Fe-Nb-REE deposit: Progresses, controversies and new understandings[J]. Minerals Deposits, 38(5): 983-1003(in Chinese with English abstract).
- Yang Z F. 2020. Review of exploitation and re-recognition of resource potential of Bayan Obo mine[J]. Rare Earth Information, 3: 6-11 (in Chinese).

附中文参考文献

- 包钢541地质勘探队. 1964. 白云鄂博铁矿主东矿之间勘探报告[R]. 5-8, 31页.
- 包钢勘察测绘研究院. 2016. 内蒙古自治区包头市白云鄂博铁矿东矿深部及其南翼铁-铌-稀土深部资源详查报告[R].
- 柯昌辉, 孙盛, 赵永岗, 李以科, 徐仲元, 郝美珍, 李瑞萍, 张丽. 2021. 内蒙古白云鄂博超大型稀土-铌-铁矿床控矿构造特征及深部找矿方向[J]. 地质通报, 40(1): 95-109.
- 谢玉玲, 曲云伟, 杨占峰, 梁培, 钟日晨, 王其伟, 夏加明, 李必成. 2019. 白云鄂博铁、铌、稀土矿床: 研究进展、存在问题和新认识[J]. 矿床地质, 38(5): 983-1003.
- 杨占峰. 2020. 白云鄂博矿开发回顾与资源潜力再认识[J]. 稀土信息, 3: 6-14.
- 中国地质科学院矿产资源研究所. 2021. 白云鄂博主、东矿相关性深部探测项目成果报告[R].
- 中华人民共和国地质部241地质勘探队. 1954. 白云鄂博铁矿主、东矿地质勘探报告[R]. 34页.
- 中苏合作地质队. 1959. 白云鄂博铁-铌-稀土和稀有元素矿床研究总结报告[R]. 82页.