

白云鄂博铁、铌、稀土矿床:研究进展、存在问题 和新认识*

谢玉玲¹, 曲云伟¹, 杨占峰², 梁培¹, 钟日晨¹, 王其伟³, 夏加明¹, 李必成¹

(1 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083; 2 中国北方稀土(集团)高科技股份有限公司, 内蒙古 包头 014010;
3 包头稀土研究院, 内蒙古 包头 014010)

摘要 白云鄂博是世界第一大稀土元素矿床,其稀土元素资源量占世界目前已知稀土元素资源总量的三分之二以上,具有重要的经济和战略地位。白云鄂博自1927年发现至今已有92年,对其的开发和研究历史悠久,在赋矿碳酸岩的成因、成矿年代、稀土矿物学等方面取得了一系列重要进展,为碳酸岩型稀土元素成矿理论发展做出了突出贡献。由于矿床经历了成矿后复杂的构造变形和热液蚀变,致使其地质、地球化学特征复杂,学界对其成因和成矿过程一直存在不同认识,对成矿碳酸岩的岩浆演化、稀土元素迁移与富集机理等方面的研究也相对薄弱。笔者最新研究表明,矿区过去被认为是下白云鄂博群的H1、H2、H9岩石单元并非沉积变质岩或变质火山岩,而应为岩浆侵入成因,矿区其他岩石单元(H3~H7)的成因也值得商榷。H9岩石单元中的黑云母岩(前人称为黑云母板岩)和富含黑云母的碳酸岩(前人称为暗色板岩)为成矿碳酸岩的一部分,是碳酸岩不同岩相带的表现。黑云母岩和富黑云母碳酸岩相对于含矿碳酸岩具有相对低的稀土元素含量和轻、重稀土元素比值,表明岩浆演化可能对稀土元素的富集和分异具有重要贡献。矿区主要岩石单元成因的新认识不仅为矿床成因、成矿背景研究提供了新的依据,同时也为研究区域构造演化、正确厘定矿区构造式样和指导矿区深部和外围找矿提供了新的思路。

关键词 地球化学;碳酸岩型稀土元素矿床;研究进展;新认识;白云鄂博

中图分类号: P618.31; P618.7; P618.79

文献标志码: A

Giant Bayan Obo Fe-Nb-REE deposit: Progresses, Controversaries and new understandings

XIE YuLing¹, QU YunWei¹, YANG ZhanFeng², LIANG Pei¹, ZHONG RiChen¹, WANG QiWei³, XIA JiaMing¹
and LI BiCheng¹

(1 Civil and Resource Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2 China Northern Rare Earth (Group) High-Tech Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 3 Baotou Research Institute of Rare Earths, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract

As the world's largest rare earth elements (REEs) deposit, the Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit accounts for more than two-thirds of the world's REEs resources, and play an important role in REEs resource economy and strategy. Since its discovery in 1927, the Bayan Obo has been exploited and studied for 92 years. Many discoveries and hypothesis involving the genesis of the deposit have been proposed and which improve the understanding to carbonatite related REEs metallogeny. However, because of the intensive post-ore deformation, metamorphism and hydrothermal alteration, the geological and geochemical characteristics of the Bayan Obo is very complex,

* 本文得到国家自然科学基金项目(编号:41472072、41072066)和国际地学对比计划项目(编号:IGCP/SIDA-600)的联合资助

第一作者简介 谢玉玲,女,1963年生,教授,博士生导师,主要从事矿床学和矿床地质化学方面的研究。Email: yulingxie63@hotmail.com

收稿日期 2019-08-06;改回日期 2019-09-16。秦思婷编辑。

leading to the long term controversy about the ore genesis. In addition, the knowledge about the magmatic evolution of carbonatite and the mechanics of REE transport and enrichment is lacking. Our new petrological and mineralogical results indicate that the H9, H2 and H1 lithological units in the area may have a magmatic intrusive origin, but they have long been regarded as metamorphic sedimentary rock or volcanic rock by previous researchers. Biotitite (previously known as biotite slate) and biotite-rich carbonatite (previously known as dark slate) of the H9 unit are intrusive magmatic rocks, comprising the outer zone of silicate-carbonatite complex. The petrogenesis of other lithological units (H3~H7) in the area is still debate. Our new understanding of above-mentioned petrogenesis and lithofacies zonation provide innovative insight for magmatic evolution of REE-host carbonatite and the mechanism controlling REEs enrichment. Comparing with the REEs host carbonatite (H8 unit), the biotitite and biotite-rich carbonatite of outer zone have lower total REEs content and LREE/HREE ratios, indicating that the magmatic evolution might have play an important role in enrichment of REEs and fractionation between LREE and HREE. The possible magmatic origin of H1~H9 also lead to re-understanding of the structure pattern of the deposit and provide significant guidance for effective mineral exploration.

Key words: geochemistry, carbonatite related REE deposit, research progress, new understanding, Bayan Obo

稀土是关键性战略金属,在国防工业、绿色能源、新能源汽车、航空、航天等领域具有日益广泛的用途,在国际资源战略中占有重要地位,日本、美国、欧盟均将稀土列入关键性战略矿产名录。中国最近通过的《全国矿产资源规划(2016~2020年)》也将包括稀土在内的24种矿产(其中金属矿产包括铁、铬、铜、铝、金、镍、钨、锡、钼、锑、钴、锂、稀土、锆)列入战略性矿产目录(中华人民共和国国土资源部,2016)。

稀土资源在世界的分布很不均衡,主要集中在美国、中国、澳大利亚、加拿大、巴西、越南等,其资源供给受地缘政治因素影响较大,这也是造成国际稀土资源市场竞争日趋激烈的主要原因。碳酸岩型稀土元素矿床是世界稀土的主要来源,贡献了世界稀土资源总量的99%以上(U.S. Geological Survey, 2018)。目前世界上已知排名前8位的稀土元素矿床,除了加拿大的Thor Lake(资源量1.5 Mt, Castor, 2008)未被证实与岩浆碳酸岩有关外,其余均为碳酸岩型稀土元素矿床,包括中国的白云鄂博(资源量112 Mt;据国家数字地质资料馆网上资料统计)、澳大利亚的Mount Weld(资源量23.9 Mt; Verplanck et al., 2016)、美国的Mountain Pass(资源量16.7 Mt; Verplanck et al., 2016)、美国的Bear Lodge Mountains(资源量6.8 Mt; Verplanck et al., 2016)、中国的牦牛坪(资源量3.17 Mt;四川地矿局109地质队,2009)、美国的Iron Hill(资源量2.6 Mt; Castor, 2008)、越南的Nam Xe(潜在资源量7.8 Mt, 核实资源量1.745 Mt; Orris et al., 2002)。

中国是世界最大的稀土生产国和稀土资源国,1995~2017年中国的稀土生产量占世界稀土总生产量的45%~95%(图1a)。中国稀土元素矿床类型多样,包括碳酸岩型、离子吸附型、热液脉型、碱性花岗岩型、伴生稀土矿床等,但碳酸岩型稀土元素矿床是中国稀土的最主要来源,其贡献了中国稀土资源总量的98%左右(图1b; Xie et al., 2019a)。中国与碳酸岩有关的稀土元素矿床主要分布在内蒙古、四川、山东、湖北省区,另外在新疆、河南、陕西等地也有发现,大地构造位置上它们主要沿古老的克拉通边缘分布(图2),包括华北克拉通北缘、东缘、南缘和扬子克拉通西缘,形成4条成矿时代各异的稀土成矿带,分别是中元古代白云鄂博-狼山稀土矿带(如内蒙古自治区的白云鄂博铁、铈、稀土矿床)、早中生代东秦岭-大别稀土矿带(如湖北的庙垭稀土矿床)、晚中生代山东莱芜-淄博-微山稀土矿带(如山东的郯山稀土矿床)和新生代四川冕宁-德昌稀土矿带(如四川的牦牛坪稀土矿床)(Xie et al., 2019a)。中国的碳酸岩型稀土元素矿床无论从矿床规模、成矿背景和研究历史上均具有得天独厚的优势,而白云鄂博是中国,也是世界稀土资源的最主要来源。据美国地质调查局2013年公布的数据(U.S. Geological Survey, 2013),世界稀土资源总量约150 Mt,白云鄂博目前探明的稀土资源量约112 Mt(表1),占世界稀土资源总量的三分之二以上,因此,白云鄂博在世界稀土资源战略中具有举足轻重的地位,是碳酸岩型稀土矿床的最典型代表。

由于白云鄂博巨大的经济意义和独特的成矿背

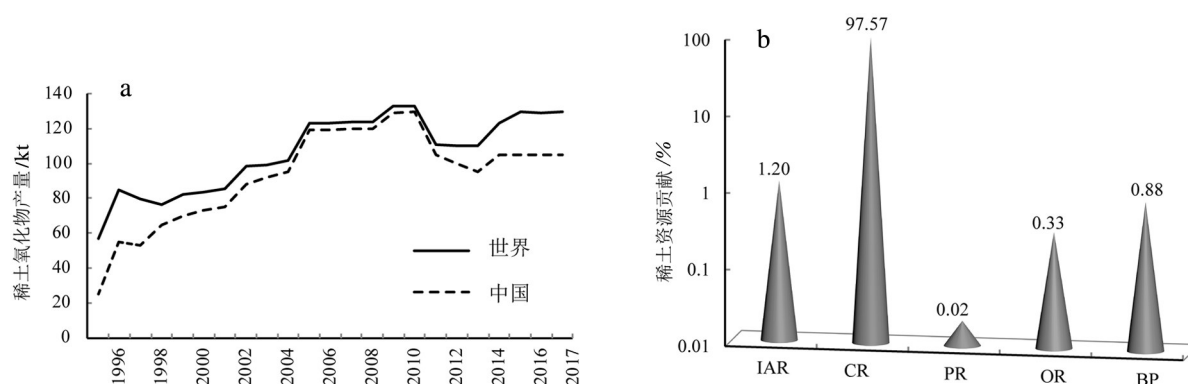


图1 1995~2017年中国与世界稀土氧化物生产量(a, 据U.S. Geological Survey, 1996~2018)及中国不同类型稀土元素矿床的资源贡献(b, 据Xie et al., 2019a)

IAR—离子吸附型; CR—碳酸岩型; PR—砂矿型; OR—其他类型; BP—伴生稀土矿床

Fig.1 Total production of REEs oxide in the world and China from 1995 to 2017 (a, after U.S. Geological Survey, 1996~2018) and relative REEs resource by percentages of various REE deposit types in China (b, after Xie et al., 2019a)

IAR—Ion adsorption REE deposits; CR—Carbonatite-related REE deposits; PR—Placer and beach placer REE deposits; OR—Other types of REE deposits; BP—Deposits with REE byproduct

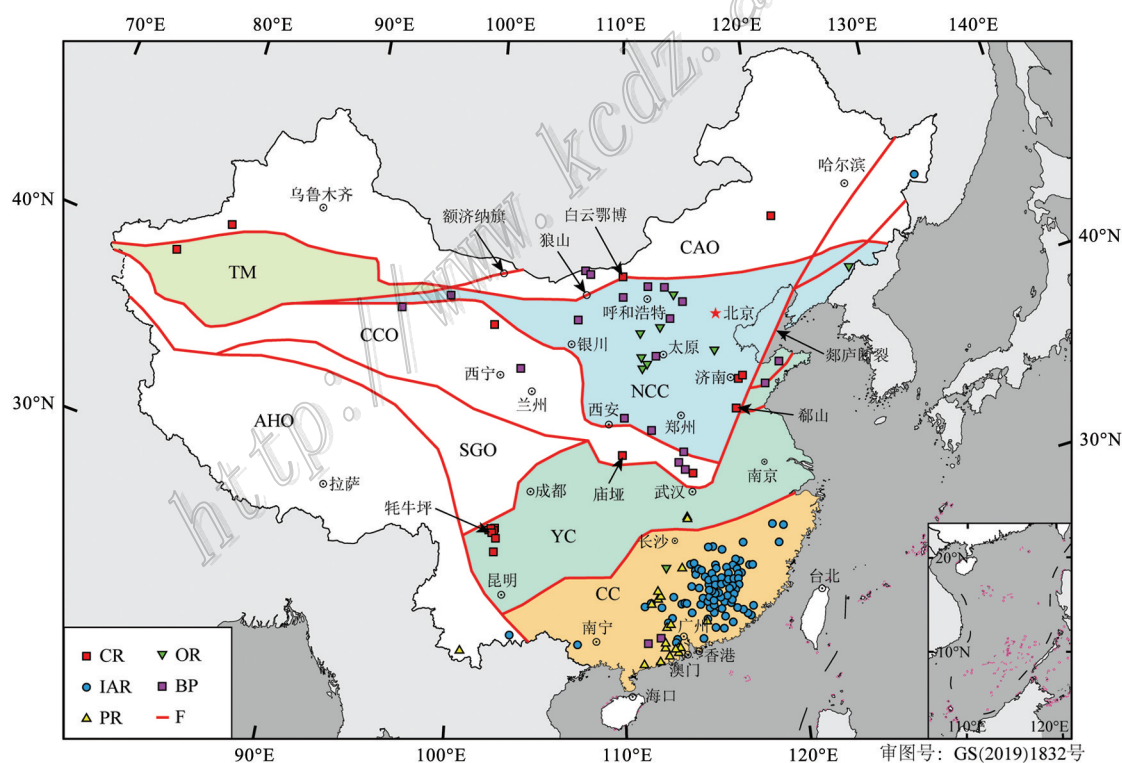


图2 中国稀土矿床分布及大地构造背景(据Xie et al., 2019a 修绘)

CR—碳酸岩型; IAR—离子吸附型; PR—砂矿型; OR—其他类型; BP—伴生稀土矿床; F—深断裂; NCC—华北克拉通; TM—塔里木地块; CAO—中亚造山带; SGO—松潘-甘孜造山带; CCO—中央造山带; YC—扬子克拉通; CC—华夏地块; AHO—阿尔卑斯-喜马拉雅造山带

Fig.2 The distribution of REE deposits in China and their tectonic setting(modified after Xie et al., 2019a)

CR—Carbonatite-related REE deposits; IAR—Ion adsorption REE deposits; PR—Placer and beach placer REE deposits; OR—Other types of REE deposits; BP—Deposits with REE byproduct; F—Deep faults; NCC—North China Craton; TM—Tarim Block; CAO—Central Asia Orogeny; SGO—Songpan Ganzi Orogeny; CCO—Central China Orogeny; YC—Yangtze Craton; CC—Cathaysia Craton; AHO—Alpine-Himalaya Orogeny

表1 白云鄂博1950年以来的主要勘查历史和资源概况

Table 1 Exploration history and resource outline of Bayan Obo since 1950

提交时间 /年	报告名称	勘探范围	铁资源量 (矿石量)/Mt	平均品位 $w(\text{Fe})/\%$	稀土资源量(REO)/ Mt	平均品位 $w(\text{REO})/\%$	勘查报告提交单位
1952	内蒙古绥远白云鄂博铁矿勘探报告	主矿、东矿、西矿	/	/	/	>1	地质所(原地质矿产部)
1953	白云鄂博铁矿勘探报告	主矿、东矿、西矿	713.59	25~52.62	110.02	0.45~8.19	中央人民政府地质部241队
1954	内蒙古白云鄂博铁矿主东矿地质勘探报告	主矿、东矿	545	35.97~33.85	0.98	4.39	地质部421队
1955	白云鄂博铁矿西矿普查报告	西矿	122.20	24.94~47.79	/	/	华北地质局241队
1959	白云鄂博铁矿主东矿底盘白云岩稀土矿床普查工作报告	主东矿下盘白云岩	/	/	39.971	1.18~4.07	冶金部包头钢铁公司541队
1960	内蒙古白云鄂博北矿铁矿床地质普查报告	北矿	0.131	36.01~49.36	/	/	包头钢铁公司第2普查队
1962	内蒙古白云鄂博东矿格勒铁矿稀土矿床地质普查报告	东矿格勒铁矿	13.24	27.03	285.072(矿石量)	0.43~4.83	包头钢铁公司地质勘探公司第2队
1963	内蒙古白云鄂博铁矿西矿第9、10矿体地质勘探总结报告	西矿	98.63	30.91~32.72	1.692	1.263~1.91	冶金部包头钢铁公司地质勘探公司
1967	内蒙古白云鄂博矿西矿钨、稀土普查报告	西矿	/	/	46.289	0.71~2.25	地质部105地质队
1977	白云鄂博铁矿主东矿储量计算说明书	主矿、东矿	653.66	/	/	/	内蒙古白云鄂博铁矿深部开拓设计地图组
1987	内蒙古自治区包头市白云鄂博铁矿西矿地质勘探报告	西矿	601.47	33.15	6.289	1.056	有色总公司内蒙地质公司
2005	内蒙古自治区包头市白云鄂博铁矿西矿资源储量复核报告 (截至2005年5月31日)	西矿	667.21	32.19	60.665	1.158~3.026	包钢集团勘察测绘研究院有限公司
2009	内蒙古自治区包头市白云鄂博矿区(外围)东南段菠萝头、东矿格勒、高磁异常区矿段稀土矿详查及东部接触带矿段稀土矿普查报告	白云鄂博外围	90.92	24.92	10.468	3.14	包钢勘察测绘研究院
2011	内蒙古自治区包头市白云鄂博铁矿西矿48—96号勘探线区段铁矿详查报告(48线—60线)	西矿48—96勘探线	34.3	33.92	0.00034	2.94	包钢勘察测绘研究院
2011	内蒙古自治区包头市白云鄂博铁矿西矿资源储量核实报告	西矿	639.7	24.96~33.2	55.36	1.094~3.026	包钢勘察测绘研究院
2012	内蒙古自治区包头市白云鄂博矿区外围西南区铁钨矿详查报告	矿区外围	0.39	25.26	/	/	包钢勘察测绘研究院

注:表中资料引自国家地质资料馆(<http://www.ngac.org.cn/>);“/”表示无数据。

景,从20世纪50年代至今,来自海内外的学者对白云鄂博矿床的地质、地球化学进行了大量的工作,在矿床地质特征、赋矿碳酸岩的成因、成矿年代、稀土矿物学等方面取得了一系列重要进展。但是,由于矿床经历了多期成矿后构造变形和热液蚀变,其地质和地球化学特征十分复杂,研究难度大,因此也造成其成因和成矿过程一直饱受争议。强烈的变形和热液蚀变造成矿区出露的主要岩石单元的原岩结构难以保留,矿物组成变化较大,这也导致了矿区前寒武纪岩石单元成因认识上的分歧。

本文在综合前人研究成果的基础上,对白云鄂博稀土矿床的研究进展和存在问题进行评述,同时,基于笔者在白云鄂博稀土矿床的新发现,提出了一些新的认识。

1 白云鄂博铁、铌、稀土矿床地质和资源概况

白云鄂博矿床最早由丁道衡先生作为铁矿床发现于1927年,详细的勘查工作集中在20世纪50年代后(表1;据全国地质资料馆网上资料)。1950~1953年,由地质部241队对主矿、东矿、西矿进行了较为详细的勘查,提交了《白云鄂博铁矿勘探报告》(表1),共探获铁矿石资源量713.59 Mt,稀土氧化物(REO)资源量110.02 Mt(表1)。20世纪50年代至80年代和2000年以后,不同地质勘查单位又多次对主矿、东矿、主东矿下盘白云岩、西矿、北矿、白云鄂博外围进行了地质勘查(表1)。按目前已有的资料统计,白云鄂博矿区总计探获铁矿石量1160 Mt,稀土氧化物112 Mt。

白云鄂博铁、铌、稀土矿床位于包头市以北约150 km处,大地构造位置位于华北克拉通北缘。华北克拉通是世界上最古老的克拉通之一,经历了自元古宙以来复杂的构造演化(Zhao et al., 1999; 2005; Zhai et al., 2011; 2013),包括古元古代末期—新元古代的多期裂谷事件(Zhai et al., 2015)、古生代与俯冲有关的多期岩浆(张宗清等, 1994; Liu et al., 2004)、变质和变形作用(张宗清等, 2003; Smith et al., 2015)等。长时间的构造演化造成了矿床复杂的地质和地球化学特征,也导致对矿床的成矿背景、成矿时代、成矿过程认识的分歧。

袁忠信等(1995)和张宗清等(2003)认为,矿区出露的地层包括古元古界色尔腾山群和中元古界白云鄂博群。色尔腾山群主要由斜长绿泥片岩、石英黑云

绿泥片岩、角闪斜长片麻岩和混合岩组成,分布于矿区东北部(图3)。白云鄂博群可分为6个岩组和18个岩性段,矿区内主要出露下白云鄂博群的H1~H9岩性段,其岩性如表2所示。尽管对H8的岩石学属性前人曾提出多种不同的成因认识,但越来越多的年代学和地球化学证据支持岩浆碳酸岩的成因观点(郝梓国等, 2002; Yuan et al., 2000; Yang et al., 2000; 2003; Fan et al., 2006; 2014; 2016),而对下白云鄂博群其他岩石单元则普遍被认为是一套沉积变质岩或变质火山岩(袁忠信等, 1995; 张宗清等, 2003)。笔者最近的研究发现,矿区出露的下白云鄂博群中所谓的砾岩和部分砂岩可能为糜棱岩化的长英质侵入岩,而H9岩石单元中的“黑云母板岩”和“暗色板岩”是碳酸岩的组成部分,也是岩浆侵入成因。因此,除H8岩石单元外,白云鄂博群其他岩石单元的成因仍值得商榷。

矿区断裂构造特别发育,包括近EW向、NW向和NW向、NE向、NS向,断裂造成矿区岩性单元走向上不连续(张宗清等, 2003)。矿区主要断裂构造以近EW向为主,包括北侧的赛乌素韧性剪切带、宽沟断裂、白云鄂博矿区南侧的逆冲断层和韧性剪切带等,还发育NE向、NW向断裂(张宗清等, 2003)。从矿区碳酸岩和其他岩石单元的变形特征看,无论是H8还是H1~H7,均显示了韧性剪切变形的特征,矿区整体应处于一个巨型韧性剪切带中,矿区北侧的赛乌素韧性剪切带和矿区南侧的韧性剪切带(张宗清等, 2003)可能都是该巨型韧性剪切带的一部分,但仍需进一步的工作证实。

矿区内侵入岩发育,包括中元古代岩浆碳酸岩、前寒武纪基性脉岩和矿区南部大面积出露的晚古生代中酸性侵入岩(张宗清等, 2003; Ling et al., 2014)。矿区的岩浆碳酸岩整体呈EW向的带状展布,延长约18 km,南北宽可达3~4 km。矿区南部的中酸性侵入岩包括石英二长岩、花岗岩等,锆石U-Pb年龄在243.2~293.8 Ma之间,表明其为晚二叠纪—早三叠纪的产物,形成于后碰撞环境(Ling et al., 2014)。矿区内的基性脉岩包括辉长岩、煌斑岩、辉绿岩,还发现有钠长岩脉、正长岩脉等,但对矿区各类岩脉的研究相对较少。

白云鄂博矿区的主要矿体包括主矿、东矿和西矿,主矿和东矿呈巨大的透镜状,而西矿由一系列近EW向排列的小矿体组成,另外在主矿的北部约5 km处发现有北矿,呈NW向产于花岗岩与板岩的接触带(张宗清等, 2003),矿区外围也发现了多处稀土矿化,如东介勒格勒、菠萝头山等(图3)。

表2 白云鄂博矿区主要岩石单元的岩性特征(据Sun et al., 2012;张宗清等, 2003;李文国等, 1996 修改)

Table 2 Brief summary of the Lower Bayan Obo Group that outcrop in Bayan Obo area (modified after Sun et al., 2012; Zhang et al., 2003; Li et al., 1996)		
岩性地层单位	岩石单元	岩性
毕鲁特组	H10	板岩夹砂岩(矿区未出露)
	H9	黑云母板岩、暗色板岩、硅质板岩、钙质板岩、富钾板岩
	H8	碳酸岩
哈拉霍格特组	H7	砂岩、板岩、白云岩互层
	H6	砂岩夹灰岩和板岩
尖山组	H5	板岩夹砂岩和灰岩
	H4	石英岩夹板岩
都拉哈拉组	H3	板岩夹砂岩和灰岩
	H2	砂岩和石英岩
	H1	粗粒砂岩和砾岩

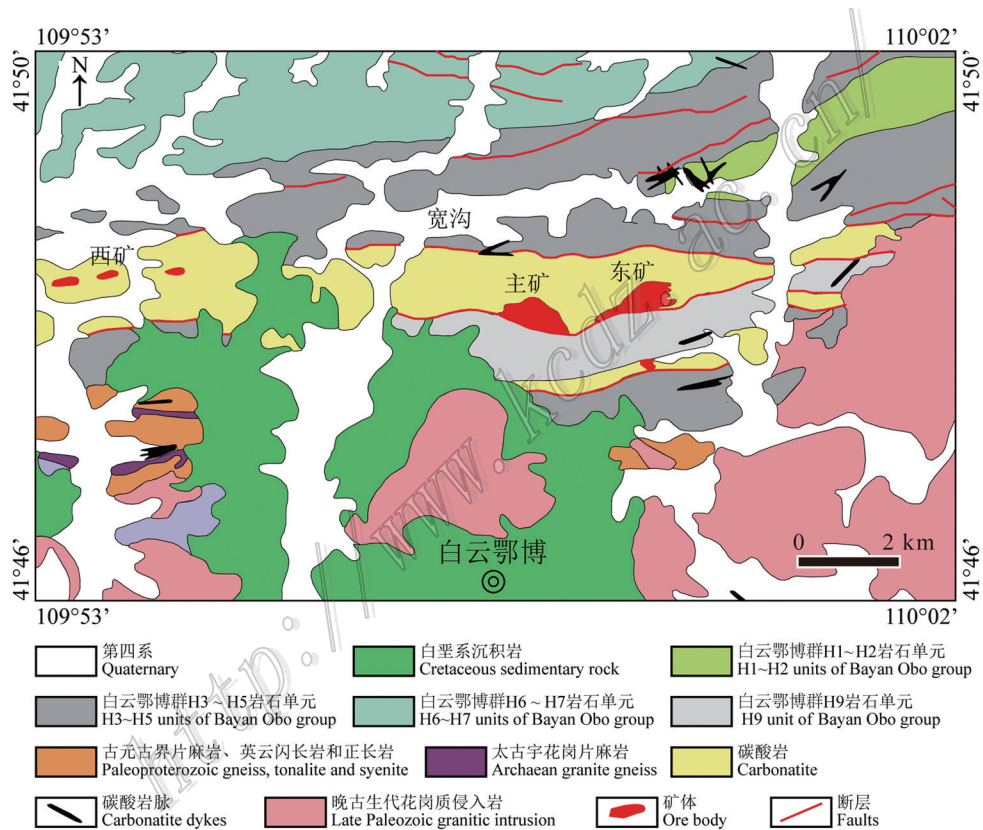


图3 白云鄂博稀土矿床地质简图(据Yang et al., 2011a;2011b; Fan et al., 2014; Zhu et al., 2015 修绘)

碳酸岩脉规模未按实际比例绘制,有夸大;地层单位与岩石单元的对应关系和岩性组成参见表2

Fig 3 Simplified geologic map of Bayan Obo REE deposit (modified after Yang et al., 2011a;2011b; Fan et al., 2014; Zhu et al., 2015)

The scale of carbonatite dikes are drawn in greater proportion, than the reality; corresponding relationship between stratigraphic and rock unit and lithologic compositions are listed in Table 2

2 白云鄂博稀土矿床主要研究进展

白云鄂博由于其巨大的经济意义和独特的地

质特征而吸引了众多海内外学者的目光。20 世纪 50 年代至今,特别是 20 世纪 80 年代以后,来自海内外的学者对白云鄂博的地质、地球化学进行了大量的工作,在成矿地质背景、赋矿碳酸岩的成

因、成矿年代、稀土矿物学等方面取得了一系列重要进展。

2.1 成矿地质背景

碳酸岩做为典型的幔源岩浆岩,其形成于张性构造背景下,主要与大陆裂谷、地幔柱活动或大规模走滑断裂有关。白云鄂博稀土矿床地处华北克拉通北缘,前人基于对成矿碳酸岩不同的成因认识和年代学结果,提出了白云鄂博稀土碳酸岩多种不同的成岩背景认识。

王楫等(1992)等对白云鄂博-狼山裂谷系进行了系统的研究,提出白云鄂博稀土矿床产于元古宙裂谷中,成矿与陆缘裂谷活动有关。周建波等(2002)基于白云鄂博群沉积成因认识提出,白云鄂博群可以划分为3个沉积组合,它们分别代表中元古代、新元古代和早古生代白云鄂博地区由陆内裂谷向陆缘裂谷转化到活动大陆边缘裂谷的沉积过程,即中元古代时其应处于陆内裂谷环境。Fan等(2016)基于前人对哥伦比亚超大陆裂解的发育时限和白云鄂博成矿碳酸岩的定年结果提出,白云鄂博稀土成矿与哥伦比亚超大陆裂解有关。也有学者认为,赋矿碳酸岩为白云质火山岩,是白云鄂博陆缘裂谷早期裂隙阶段岩浆活动的产物(肖荣阁等, 2003a)。尽管仍有学者对白云鄂博矿床赋矿白云岩的成因持不同观点,认为其形成于早古生代被动大陆边缘环境,为热水沉积成因(章雨旭等, 2012),但大多数学者支持白云鄂博稀土矿床形成于伸展构造背景,与裂谷活动有关。

2.2 赋矿碳酸岩的成因和成岩年代

白云鄂博赋矿“白云岩”的成因一直是研究的热点和争议的焦点。前人基于地质、地球化学研究结果曾提出了多种不同的成因认识,包括喷出碳酸岩成因(肖荣阁等, 2003a; Wang et al., 2010)、侵入碳酸岩成因(周振玲等, 1980; 刘铁庚, 1985; Le Bas et al., 1992)、海相沉积成因(孟庆润, 1982; 侯宗林, 1989; 刁乃昌, 1990; 杨子元等, 1994; 章雨旭等, 2012)、热水沉积成因(杨子元等, 1994; 章雨旭等, 2012)、火山喷气沉积成因(袁忠信等, 1991)、岩浆热液交代成因(Chao et al., 1997; Wang et al., 2003)、碳酸岩流体交代沉积碳酸盐岩成因(Lai et al., 2012)、经热液叠加改造的沉积岩成因(侯宗林, 1989; 孟庆润等, 1992; Qin et al., 2007; 杨晓勇等, 2000)、来自俯冲板片富硅流体交代沉积碳酸盐岩成因(Ling et al., 2013)等。近年来,越来越多的年代学和地球化学证据支持岩

浆碳酸岩的成因观点,此认识被越来越多的学者接受(Fan et al., 2016)。

对于碳酸岩的侵位年龄也长期存在争议,前人曾对矿区H8赋矿白云岩、碳酸岩脉进行了大量的年代学研究,包括锆石U-Pb、全岩和单矿物Sm-Nd、黑云母和钠铁闪石的K-Ar、Ar-Ar定年等,已报道了从太古宙至晚古生代的多种年龄数据(裘愉卓, 1997; Chao et al., 1997; Wang et al., 1994; 刘兰笙等, 1996; Yang et al., 2011a; 2011b; Fan et al., 2014)。有学者认为矿区可能经历了多期成矿事件,包括中元古代和古生代(Liu et al., 2004; 袁忠信, 2012; 朱祥坤等, 2012; Ling et al., 2014)。近年来,随着现代测年技术的提高和新方法的应用,越来越多的年代学数据支持中元古代幔源碳酸岩的观点,认为其侵位年龄应在1.40~1.25 Ga(任英忱等, 1994; 张宗清等, 2003; 袁忠信等, 1991; 张宗清等, 1994; Yang et al., 2011a; Fan et al., 2014)。白云鄂博地区除了具有克拉通基底的岩石记录(2.4~2.5 Ga)以外,还存在有2.0 Ga的岩浆活动,以及~1.9 Ga的一期强烈变质事件(范宏瑞等, 2010),因此已报道的较老的成矿年龄数据(>1.9 Ga)可能是由于碳酸岩在侵位过程中捕获了围岩(基底岩石)中的锆石所致,而其他相对较新的成岩、成矿年龄数据(1000~400 Ma)则被认为是受到后期热扰动结果(Zhu et al., 2015; Song et al., 2018)。

2.3 稀土矿物学研究取得重要进展

白云鄂博矿床的矿物组成极其复杂,是一座天然的矿物宝库,特别是稀土矿物类型多样。杨学明等(1999)、张培善等(2001)和Zhang等(2002)对白云鄂博的矿物学进行了大量的工作,基于白云鄂博矿床矿物组成的研究,发现和命名了一批新矿物。至20世纪90年代,在白云鄂博发现的新矿物已将近20种(张培善, 1958; 1991),其中11种被国际矿物学会(IMA)新矿物命名与分类委员会认定(杨主明等, 2007),包括黄河矿— $\text{Ba}(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd})(\text{CO}_3)_2\text{F}$ 、氟碳铈钡矿— $\text{Ba}_3\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_5\text{F}_2$ 、白云鄂博矿— $\text{NaBaCe}_2(\text{CO}_3)_4\text{F}$ 、铈褐钇铌矿— $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \text{RE}, \text{Th})(\text{Nb}, \text{Fe})\text{O}_4$ 、钹褐钇铌矿— $(\text{Nd}, \text{Ce}, \text{RE}, \text{Fe})(\text{Nb}, \text{Ti})(\text{O}, \text{OH})_4$ 、钹易解石— $(\text{Nd}, \text{Ce}, \text{Ca}, \text{Th})(\text{Ti}, \text{Nb}, \text{Fe}^{3+})_2(\text{O}, \text{OH})_6$ 、铈易解石— $(\text{Ce}, \text{Nd}, \text{Ca}, \text{Th})(\text{Nb}, \text{Ti})_2(\text{O}, \text{OH})_6$ 、包头矿— $\text{Ba}_4(\text{Ti}, \text{Nb}, \text{Fe})_8\text{O}_{16}(\text{Si}_4\text{O}_{12})\text{Cl}$ 、钡铁钛石— $\text{Ba}(\text{Fe}, \text{Mn})_2\text{Ti}(\text{O}, \text{OH}, \text{Cl})_2(\text{Si}_2\text{O}_7)$ 、大青山矿— $\text{Sr}_3\text{RE}(\text{PO}_4)(\text{CO}_3)(\text{OHF})_2$ 、硅钡钼石— $\text{KBa}(\text{Al}, \text{Sc})(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_6\text{Si}_6\text{O}_{20}\text{F}_2$ 。1965年发现氟碳铈钡矿— Ba_3Ce_2

(CO_3)₅F₂,它被认为是岩浆期后热液交代碳酸岩而形成的(张培善等,1983)。白云鄂博矿,由傅平秋等(1987)发现,被认为是含Na的氟碳酸盐类稀土矿物,主要产于白云鄂博强烈钠辉石化的碳酸岩型铈稀土矿石中。随着氟碳铈钍矿含有Na和少量Ca及空位的现象被证实,白云鄂博矿被确认为与氟碳铈钍矿为同一矿物种。中华铈矿— $\text{Ba}_2(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd})(\text{CO}_3)_3\text{F}$ (张培善等,1981)亦被库哈恩柯矿— $\text{Ba}_2\text{Ce}(\text{CO}_3)_3\text{F}$ 所取代。

进入21世纪,关于白云鄂博矿物学的研究又有了新的进展,张培善石、丁道衡矿、杨主明矿等新矿物被陆续发现。张培善石(Zhangpeishanite)— BaFCl ,由Shimazaki等(2008)发现于萤石中,呈矿物包裹体形式产出,属于氟氯铅矿族;丁道衡矿(Dingdao-hengite)— $\text{Ce}_4\text{Fe}^{2+}\text{Ti}_2\text{Ti}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)_2\text{O}_8$,产出与花岗岩与碳酸岩接触带处的Mg矽卡岩中,属于硅铈钍钇矿族(Xu et al., 2008);杨主明矿(Yangzhumingite)— $\text{KMg}_{2.5}\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{F}_2$,由Miyawaki等(2011)发现,产出与变质碳酸岩中,属于云母族。到目前为止,白云鄂博被认定的新矿物种数已达13种,约占中国新矿物种数的九分之一,对于中国矿物学研究具有重要意义。

除发现和命名了一批新矿物外,白云鄂博的富Sc矿物研究也取得重要进展,发现了多种富Sc矿物,包含铈铁金红石、硅铈钍石、硅铈钍钇矿和霓石等(杨主明等,2007;Shimazaki et al., 2010),为矿区铀资源的开发和利用提供了重要依据。

3 白云鄂博矿床研究相对薄弱之处和存在问题

尽管白云鄂博研究者众多,研究历史悠久,但至今在矿床成因、稀土元素富集机理、成矿地质背景等方面仍存在不同见解,在基础地质方面其认识仍多沿用了20世纪50年代至90年代的区域地质资料。综合前人研究成果和笔者最近在白云鄂博矿区的新发现(Xie et al., 2019a),笔者认为目前白云鄂博矿床研究中存在的主要问题或研究相对薄弱之处主要包括以下几个方面:

(1) 基础地质研究仍需加强,矿区前寒武纪岩石单元的成因值得商榷

白云鄂博研究和开发历史悠久,对矿区地质、地球化学前人进行了长期的工作,但研究的焦点主要集中在赋矿碳酸岩本身,而对矿区其他岩石单元,特

别是H1~H7的研究相对较少,多沿用了前人区域地质调查的成果。

H1~H7岩石单元一直被认为是一套沉积变质岩,岩性包括砂岩、砾岩、石英岩、板岩、灰岩等。对H9岩石单元的研究较H1~H7稍详细,其主体仍被认为是变质沉积岩或变质火山岩(张宗清等,2003;袁忠信等,1995),而对矿区H9板岩中的富钾板岩更是提出了多种不同的成因认识,包括热水沉积成因或热液交代成因等(肖荣阁等,2003b;费红彩,2007),但总体仍属地层的研究范畴。笔者最近的研究表明,矿区出露的所谓“砂岩、砾岩、板岩”并非变质沉积岩或变质火山岩,其中至少大部分为岩浆侵入成因(详见后文),因此,矿区主要岩石单元的成因研究仍需进一步深入。

(2) 碳酸岩的母岩浆性质、岩浆演化研究仍较薄弱

尽管越来越多的学者支持白云鄂博赋矿“白云岩”(H8)为碳酸岩的观点,但与世界大多稀土碳酸岩常与同期的碱性硅酸岩共生不同,白云鄂博未见与碳酸岩同期的碱性侵入岩的报道,是否存在碱性硅酸岩与碳酸岩熔体的不混溶缺少直接证据。白云鄂博碳酸岩成分变化较大,除典型的白云石碳酸岩、方解石碳酸岩、方解石-白云石碳酸岩外(Yang et al., 2011a),还发育有富磁铁矿和萤石、富黑云母的多种碳酸岩(Xie et al., 2019a)等。前人对矿区碳酸岩、H9板岩进行了详细的地球化学研究,但由于赋矿碳酸岩的岩石组成复杂、空间分布不均,另外,受碳酸岩侵入后多期岩浆-热事件的影响,矿区蚀变发育、蚀变矿物组成复杂,也给碳酸岩的原岩性质、源区特征研究带来一定的困难。笔者最近研究发现,矿区H9岩石单元中的黑云母岩(前人称黑云母板岩或黑云母片岩)、富黑云母碳酸岩(前人称暗色板岩)为碳酸岩体的组成部分,其分布于碳酸岩两侧,与碳酸岩无明显边界,可能是碳酸岩体的一部分,代表了碳酸岩的岩相分带(Xie et al., 2019a)。目前,对矿区碳酸岩的母岩浆性质、岩浆演化的认识是基于H9为碳酸岩围岩的基础上提出的,有一定的局限性。

(3) 稀土元素来源、迁移、富集及沉淀机理研究仍有待深入

对矿区稀土元素的来源、迁移与富集机理,前人进行了一定的工作,但仍存在认识上的分歧。基于碳酸岩的不同成因认识和矿床成因认识,前人提出了包括陆源风化产物(孟庆润,1982)、幔源碳酸岩浆(曹荣龙等,1994;杨奎锋等,2010;Fan et al., 2014; 2016)、古生代中酸性侵入体有关(侯宗林,1989)、俯

冲带富硅流体(Ling et al., 2013)等多种认识,但仍以碳酸岩的观点占主导地位。

关于碳酸岩的成因目前存在不同认识,有学者认为其可以直接由地幔的低程度部分熔融形成(Dawson, 1964; Woolley et al., 2008a),也有学者认为其母岩浆应该是碳酸盐化硅酸岩浆,其上侵到地壳浅部发生碳酸岩浆与碱性硅酸岩浆的不混溶(Wendlandt et al., 1979),或多相不混溶(Zhang et al., 2017)形成,在不混溶过程中稀土元素倾向于进入碳酸岩浆,因此造成碳酸岩稀土元素富集(D'Orazio et al., 1998; Zhang et al., 2017)。也有学者认为,碳酸岩浆是硅酸岩浆经强烈分异形成,结晶分异是造成残余碳酸岩浆稀土元素的富集的主要机制(Twyman et al., 1987; Doroshkevich et al., 2017)。

做为典型的幔源岩浆岩,碳酸岩在世界范围内并不稀少,但其中只有少数发育稀土矿化。Woolley等(2008b)建立了世界上已发现的527个碳酸岩产地的数据库,而近年在中国的西藏地区(曲晓明等, 2009; 陈华等, 2010)、内蒙古赤峰地区(Xie et al., 2019b)、内蒙古丰镇地区(许成等, 2019)、四川攀枝花地区(周清等, 2019)、河北省怀安地区(许成等, 2019),以及越南(Orris et al., 2002; Thi et al., 2014)等地相继发现一系列碳酸岩产地,目前世界上发现的碳酸岩产地保守估计应在550个以上,但世界上已知的碳酸岩型稀土矿床不足100个。已有的碳酸岩岩石化学分析表明,不成矿的碳酸岩稀土元素含量一般并不高(Xie et al., 2019b),多在 $n \times 10^{-4}$ 以内,但成矿碳酸岩的稀土元素含量可以非常高,特别是轻稀土元素,可以达到原始地幔的几万倍(图4),但对造成成矿碳酸岩轻稀土元素强烈富集的原因目前尚不清楚。

前人研究表明,富稀土元素的地幔源区是形成稀土碳酸岩的关键,而俯冲板片流体或熔体交代及富稀土元素的大洋沉积物再循环是造成地幔源区富稀土元素的主要原因(Hou et al., 2015)。现在海底调查结果表明,大洋沉积物稀土元素含量高,稀土元素总量可以达到 $n \times 10^{-3}$ (Kato et al., 2011),特别是远洋沉积物和大洋锰结核中稀土元素含量更高(Hein et al., 2014; 2015),其俯冲交代可以形成富稀土元素的地幔源区。大洋沉积物中不仅富集轻稀土元素,其重稀土元素含量也很高,轻、重稀土元素分异不强烈(Kato et al., 2011),因此,大洋沉积物再循环是造成源区稀土元素富集的原因,但不能造成成矿碳酸岩轻

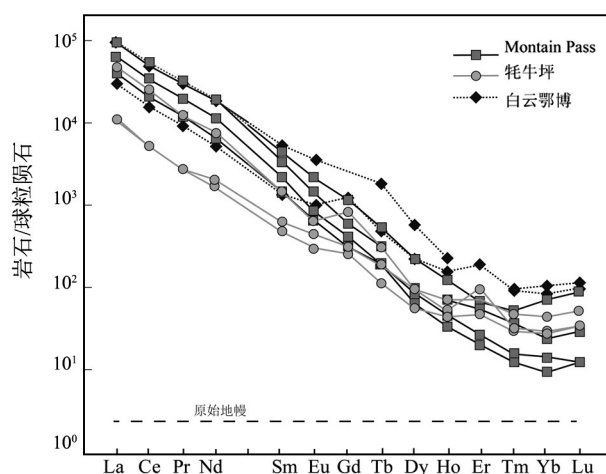


图4 世界典型矿床成矿碳酸岩的稀土球粒陨石标准化曲线
(据 Verplanck et al., 2016)

Fig.4 Chondrite-normalized rare earth elements patterns of carbonatite from key REE deposits in the world
(after Verplanck et al., 2016)

稀土元素强烈富集的特征。实验地球化学结果表明,地幔低程度部分熔融过程中可以形成碳酸岩岩浆,且可造成碳酸岩中稀土元素,特别是轻稀土元素富集,但相对于其地幔源岩,其稀土元素富集系数并不大($n \sim n \times 10$),且轻、重稀土元素富集系数差别较小(Foley et al., 2009),与成矿碳酸岩轻稀土元素强烈富集的特征不同。笔者认为,除源区稀土元素富集外,碳酸岩浆演化和岩浆流体转化过程中稀土的进一步富集和轻、重稀土元素分异可能是造成稀土成矿的重要原因,但对碳酸岩浆演化过程和熔-流体转化过程中稀土元素的富集和分异机理仍缺少系统的研究。

(4) 成矿流体研究相对较薄弱,硫酸盐在白云鄂博稀土元素迁移及富集中的作用未得到足够重视

碳酸岩流体是白云鄂博稀土成矿的关键(Smith et al., 2000; Fan et al., 2006; 2016; Qin et al., 2007; Lai et al., 2016)。前人对白云鄂博稀土矿床的含矿碳酸岩、蚀变围岩和周边碳酸岩脉中主要组成矿物(如方解石、重晶石、萤石、石英)中的熔流体和流体包裹体进行了一定的工作(Smith et al., 2000; 倪培等, 2003; Fan et al., 2004; 2006; Qin et al., 2007),但由于矿区经历了多期的变形、变质,给流体包裹体研究带来很大困难,也导致了对流体出溶机制、出溶流体性质、稀土元素迁移和沉淀机理认识上的分歧。Smith等(2000)认为,白云鄂博稀土成矿流体演化早期为高温、高压的富 CO_2 流体,晚期演化为低温、低

压的富水流体,矿化发生在流体演化晚期较低的温度下。Fan等(2004; 2006)对稀土矿石中萤石、石英中流体包裹体研究表明,其包裹体类型包括二相和三相的富 CO_2 流体包裹体、三相的高盐度流体包裹体和二相的水溶液流体包裹体,包裹体均一温度变化范围较大($100\sim 450^\circ\text{C}$),并提出与白云鄂博稀土-铌矿化有关的流体为 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}-(\text{F}-\text{REE})$ 流体体系(Fan et al., 2006),其中,含子矿物的流体包裹体中发现有钾石盐、重晶石和稀土碳酸盐子矿物(Fan et al., 2004; 2006)。白云鄂博稀土矿石中含大量硫酸盐矿物(如重晶石)、流体包裹体中也发现有硫酸盐子矿物(Fan et al., 2004; 2006),表明白云鄂博成矿流体是富含 SO_4^{2-} 的。另外,Qin等(2007)在白云鄂博稀土矿床的萤石中也发现了含多子晶的熔流体包裹体,其包裹体类型和岩相学特征与牦牛坪稀土矿床发育的富硫酸盐熔流体包裹体(Xie et al., 2009;

2015)十分相似。笔者最近在条带状铁-稀土矿石的萤石中发现有保存较好的、沿生长环带分布的原生碳酸盐-硫酸盐熔体包裹体(图5a、b)和多相硫酸盐熔体包裹体(图5c、d; Xie et al., 2019a),表明成矿碳酸岩熔体及出溶流体中应富含 SO_4^{2-} 。

近年来, SO_4^{2-} 在稀土元素迁移中的作用得到越来越多学者的重视(Xie et al., 2016; 2019a; Migdisov et al., 2016),从包裹体(Xie et al., 2009; 2016; 2019a)和地球化学热力学方面证实了硫酸根为稀土元素迁移的主要配体(Migdisov et al., 2016),且含 SiO_2 的硫酸盐-水体系中硫酸盐具有很高的溶解度和稀土元素迁移能力(Cui et al., 待刊),但以往的白云鄂博成矿流体研究,对 SO_4^{2-} 在稀土元素迁移与沉淀中的作用关注不够,仍有待深入研究。

(5) 成矿地质模型有待完善

成矿地质模型是矿床学研究的重要内容,也是

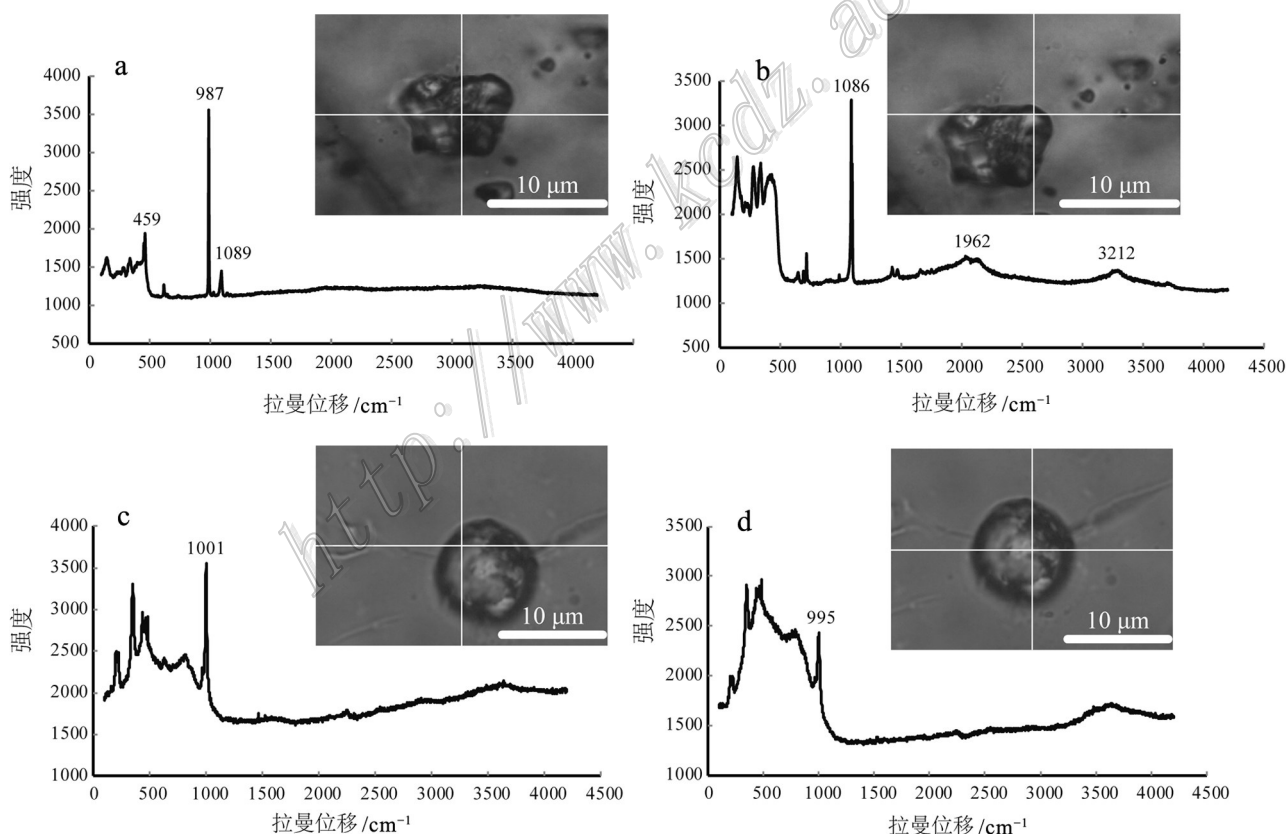


图5 白云鄂博萤石中硫酸盐-碳酸盐和多相硫酸盐熔体包裹体的显微照片和拉曼谱图(据Xie et al., 2019a)
a. 碳酸盐-硫酸盐熔体包裹体中的硫酸盐相;b. 碳酸盐-硫酸盐熔体包裹体中的碳酸盐相;c、d. 萤石中多相硫酸盐熔体包裹体
Fig 5 Laser Raman Microanalysis (LRM) results of sulfate- and carbonate-bearing melt inclusions in fluorite from banded REE-iron ore in Bayan Obo(after Xie et al., 2019a)

a. Sulfate phase in the melt inclusion; b. Carbonate phase in the melt inclusion; c, d. Sulfate in the multi-phases sulfate melt inclusion

指导找矿的最重要依据,其内容涵盖了成矿地质背景、矿床成因、成矿流体特征、矿质迁移与沉淀机制、矿化蚀变特征等多个方面。矿床地质,特别是赋矿岩石的成因是矿床成因研究的基础,也是建立矿床模型的关键,其直接影响了对成矿地质背景、矿床成因、控矿构造式样等的认识。前人对白云鄂博的矿床成因进行了大量的工作,基于H1~H7、H9为变质地层认识初步提出了白云鄂博的成矿地质模型(Xie et al., 2016),但其仍不能很好地解释白云鄂博已有的地质、地球化学特征,如板岩与碳酸岩在矿物组成和化学组成上呈现连续变化、铁矿化和稀土矿化紧密共生,同时,对碳酸岩的岩浆演化过程对稀土元素富集和分异的贡献尚缺少系统的工作。

目前,多数学者认为矿区赋矿“白云岩”为碳酸岩,而对矿区其他岩石单元(H1~H7、H9)多被认为是一套变质地层,与成矿无关。笔者最近的研究表明,除H8外,H9岩石单元中的黑云母岩和富黑云母

碳酸岩也是碳酸岩体的一部分,是碳酸岩岩相分带的表现,并非前人认为的变质地层。另外,对矿区H1~H7岩石单元的成因也值得商榷,很可能也为岩浆侵入成因(详见后文),因此,已有的基于变质地层认识提出的矿床模型仍需进一步改进和完善。

4 白云鄂博岩石单元新认识及其理论和实际意义

4.1 H1、H2岩石单元的成因

野外观察发现,在H1岩石单元中所谓变质砾岩和H2岩石单元中所谓变质砂岩中常可见自形的长石,手标本看长石十分新鲜,与一般砂岩、砾岩中碎屑长石常有一定的磨圆度不同。岩相学观察表明,其岩石结构变化于典型的岩浆结构(图6a)和典型的糜棱岩化花岗岩结构(图6b、c)之间,表明岩石明显经历了韧性剪切变形和动态重结晶。在变形较弱的

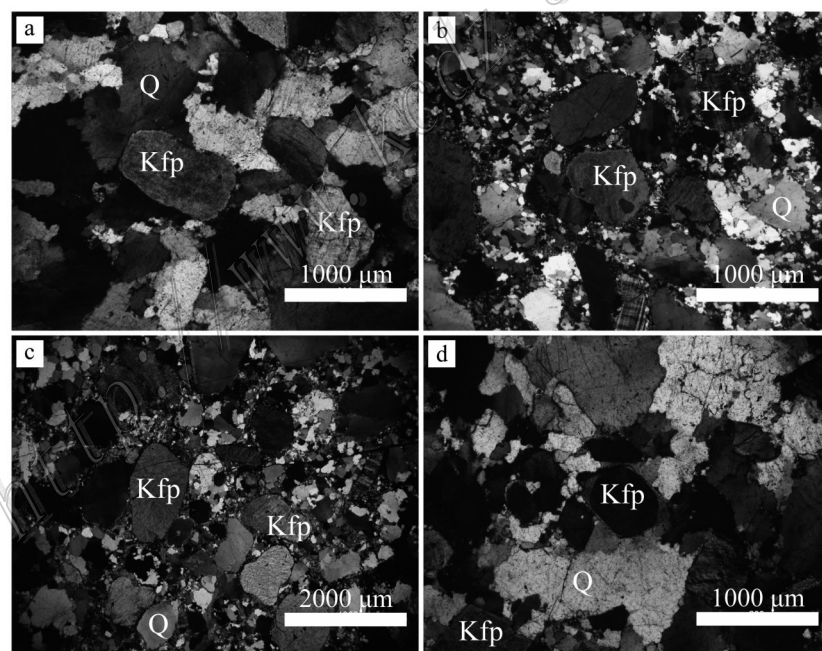


图6 白云鄂博矿区北部“砾岩”的显微镜下照片(正交偏光)

- a. 弱变形域中的花岗结构,石英颗粒边部发育动态重结晶;b. 糜棱岩化花岗岩,可见石英内部的亚颗粒旋转重结晶,基质为细粒化石英和钾长石;c. 糜棱岩化花岗岩,基质为细粒化的钾长石和石英;d. 弱变形花岗岩,其中钾长石呈自形晶,石英发育明显的动态重结晶

Q—石英;Kfp—钾长石

Fig 6 Photomicrographs of “conglomerate” in North of Bayan Obo mining area (crossed nicols)

- a. Granitic texture of weakly deformed domain, and with dynamic recrystallization of edge of quartz; b. Mylonized granite showing rotating recrystallization of sub-particle of quartz with fine-grained matrix of quartz and K-feldspar; c. Mylonized granite with fine-grained matrix of quartz and K-feldspar; d. Weakly deformed granite with euhedral K-feldspar and dynamic recrystallized quartz

Q—Quartz; Kfp—K-feldspar

部分,其中长石呈自形晶(图6d),而石英边部和内部发育亚颗粒、亚颗粒旋转重结晶或细粒化现象(图6a、d)。

岩矿相和SEM/EDS结果表明,这些所谓的砾岩和粗粒砂岩中矿物组成复杂,包括石英、钾长石、锆石、磷灰石、独居石等。锆石(图7a、b)和磷灰石均呈自形晶产于石英、长石粒间或包裹于长石、石英中,磷灰石以富F的磷灰石为主。锆石的阴极发光显示明显的岩浆震荡环带(图7c、d),表明其为岩浆岩的原生矿物,而非碎屑锆石(Xie et al., 2019a)。

H2岩单元中的所谓石英砂岩也显示了韧性剪切带岩石的特征(图8a),其矿物组成以石英为主,并含少量长石、锆石、磷灰石、金红石、磁铁矿等,石英可见波状消光(图8b)和边部的动态重结晶及细粒化现象(图8b~d),有时可见长石的自形晶,且与石英呈平直边界(图8c),与变余砂状结构中重结晶形成的结构特征明显不同。这些所谓砂岩的岩石结构和矿物组成指示其可能为岩浆成因。

4.2 H9岩石单元成因新认识及碳酸岩岩相分带的发现

H9板岩是碳酸岩的直接围岩,无论是西矿还是主矿、东矿,碳酸岩南、北两侧均发育有板岩。野外和岩相学结果表明,H9主要岩性包括黑云母板岩(片岩)、暗色板岩、黑色(碳质)板岩和富钾板岩。笔者对采自主矿和西矿的H9板岩进行了详细的岩相学和SEM/EDS分析。结果表明,H9的岩性组成复杂,按其矿物组成可分5类,第一类主要为黑云母组成,并含较多的磷灰石(图9a),前人称之为黑云母板岩;第二类主要由黑云母(或金云母)和碳酸盐矿物组成(图9b、c),前人称之为暗色板岩;第三类主要由碳酸盐矿物组成(图9d),局部发育强糜棱岩化(图9d),前人称为钙质板岩;第四类主要由石英、钠长石组成,前人称之为硅质板岩,第五类主要由钾长石组成,即前人所说的富钾板岩。

SEM/EDS结果表明,所谓黑云母板岩的矿物组成主要为黑云母、金云母和磷灰石(图10a、b),并含

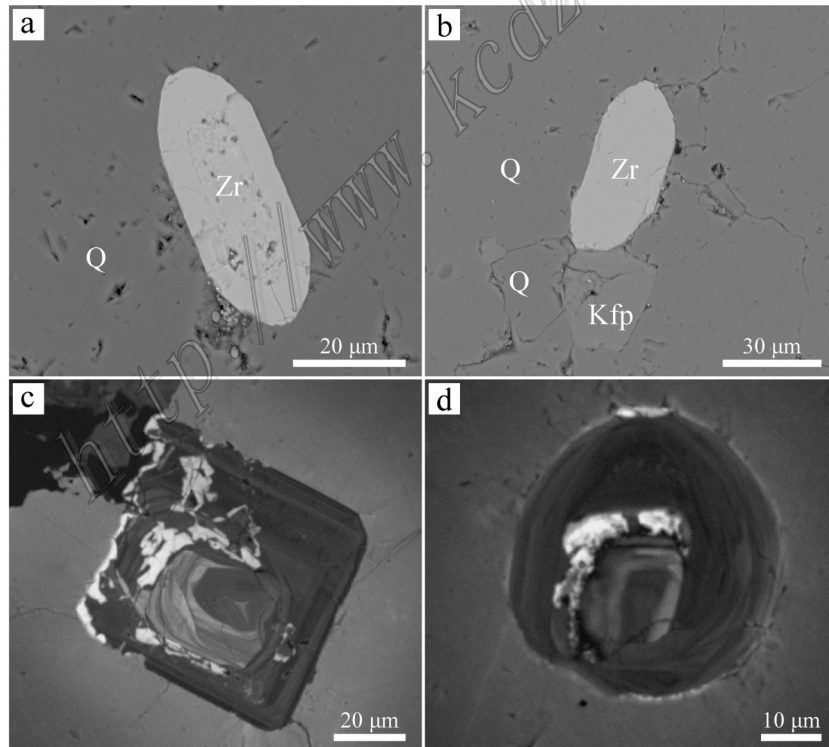


图7 白云鄂博H2岩石单元中锆石的背散射电子图像(BSE)(a、b)和阴极发光图像(CL)(c、d)

Q—石英;Kfp—钾长石;Zr—锆石

Fig. 7 Back-scattered electron (BSE)(a, b) and cathodoluminescence (CL)(c, d) images of zircon in H2 unit of Bayan Obo

Q—Quartz; Kfp—K-feldspar; Zr—Zircon

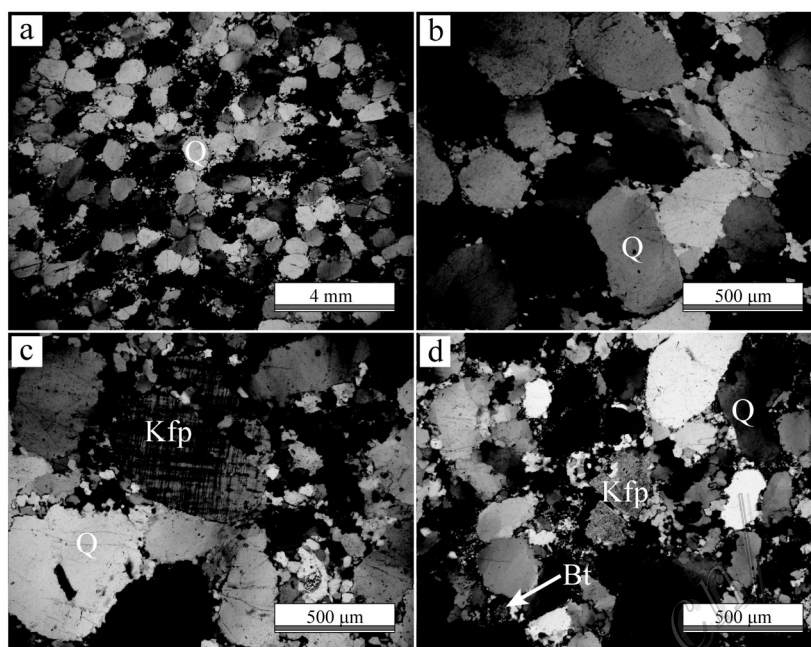


图8 白云鄂博矿区北部H2岩石单元中“石英砂岩”的岩相学照片
(a、b为同一样品不同放大倍数;c、d与a、b同一样品不同切片位置,正交偏光)
Q—石英;Kfp—钾长石;Bt—黑云母

Fig. 8 Photomicrographs of “sandstone” from H2 unit in North of Bayan Obo mining area (cross ed nicols)
(a, b are from same slice but with different scale; c, d are from the same sample with a and b, but from different domain)
Q—Quartz; Kfp—K-feldspar; Bt—Biotite

少量磁铁矿、钛铁矿、辉钼矿、尖晶石、锆钙钛矿、锆石等,显示超镁铁岩的典型矿物组合,应定名为黑云母岩。所谓暗色板岩的矿物组成主要为金云母、黑云母、碳酸盐矿物和磁铁矿(图10c、d),并发现有磷灰石、独居石、氟碳铈矿、重晶石、锆石等,其矿物组成与赋矿碳酸岩基本一致,应为富黑云母的碳酸岩,而主要由碳酸盐矿物组成的岩石单元其矿物组成与碳酸岩一致,主要由白云石、方解石组成,并含少量黑云母、重晶石、氟碳铈矿、磁铁矿等。在H9岩石单元中有时可见硅质板岩中由黑云母岩和富黑云母碳酸岩组成的细小岩脉,脉的外侧主要由黑云母组成,向内为含稀土矿物和重晶石的富黑云母的碳酸岩(图11a),显示出明显的矿物学分带,X射线元素扫描结果(图11b~f)也显示出明显的元素分带特征,其应为碳酸岩细脉。碳酸岩脉两侧主要由钠长石、石英和黑云母组成,可能代表了与碳酸岩同期的钠化、黑云母化蚀变。上述研究结果表明,黑云母岩和富黑云母的碳酸岩构成碳酸岩-硅酸岩杂岩体的一部分,其矿物组成连续变化,其间无明显分界,应代表

了碳酸岩的岩相分带。前人对H9板岩的年代学结果也表明,其与碳酸岩具有相似的成岩年龄,全岩Re-Os年龄为 $(1447 \pm 42)\text{Ma}$ (Liu et al., 2016),锆石的U-Pb模式年龄为 $(1505 \pm 12)\text{Ma}$ (Lai et al., 2016),与H8最新的锆石U-Pb年龄 $(1418 \pm 29)\text{Ma} \sim (1417 \pm 19)\text{Ma}$; Fan et al., 2014)、氟碳铈矿U-Pb年龄 (1.4 Ga) ;杨岳衡等,待刊资料)相当,进一步表明H9中的黑云母岩和富黑云母碳酸岩应为成矿碳酸岩的同期产物。

4.3 岩石单元成因新认识在碳酸岩岩浆演化研究和找矿中的意义

岩石成因是成矿地质背景、区域构造演化、矿床成因、矿床模型研究的前提和基础,前人基于矿区主要岩石单元为变质地层的认识曾提出了白云向斜和宽沟背斜的认识,并提出了向斜核部找矿的思路(章雨旭等,2012),但近年的勘查结果证实,白云向斜可能并不存在。本文的研究结果表明,H1、H2、H9岩石单元可能并非前人认为的变质地层,而是岩浆侵入成因,那么区内其他与H1、H2、H9岩性相似的岩石单元(H3~H7)的成因也值得商榷。若区内H1~H7

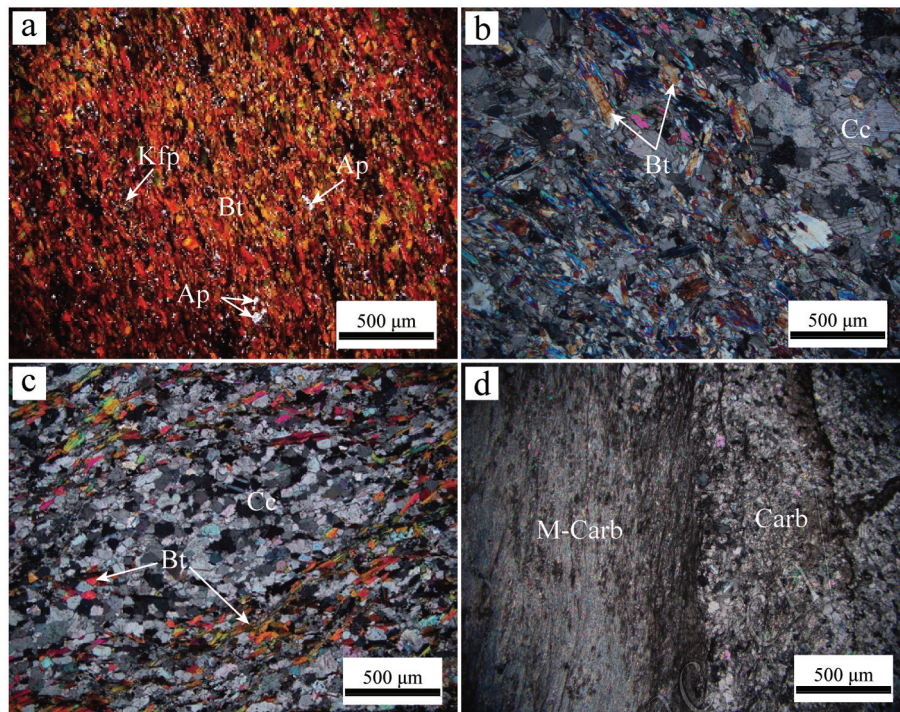


图9 白云鄂博H9岩石单元不同岩性的显微岩相照片(透射光,正交偏光)

a. 黑云母岩; b, c. 富黑云母碳酸岩; d. 糜棱岩化碳酸岩

Bt—黑云母; Kfp—钾长石; Ap—磷灰石; Cc—方解石; Carb—碳酸岩; M-Carb—糜棱岩化碳酸岩

Fig. 9 Micrography of varied lithologies from H9 unit in Bayan Obo (cross-polarized light)

a. Biotitite; b, c. Biotite rich carbonatite; d. Mylonitized calcite carbonatite

Bt—Biotite; Kfp—K-feldspar; Ap—Apatite; Cc—Calcite; Carb—Carbonatite; M-Carb—Mylonitized carbonatite

和H9并非前人认为的变质地层,那么对白云鄂博矿床的成矿地质背景、矿区构造式样、成矿模型需重新认识。

(1) 岩相分带在碳酸岩岩浆演化和稀土元素分异、富集机理中的意义

岩浆的粘度与岩浆的温度、化学组成、挥发分含量、晶体含量有关,碳酸岩岩浆由于其富含挥发分和独特的化学组成,因此其粘度极低,其在侵位过程中的行为更接近于水流体,可以20~65 m/s的速率快速上侵(Genge et al., 1995)。相对于贫硅的碳酸岩,白云鄂博碳酸岩相对硅含量较高(碳酸岩脉 $w(\text{SiO}_2)$ 最高可达12.43%; Yang et al., 2011a),考虑到黑云母岩和黑云母碳酸岩也为碳酸岩体的一部分,其母岩浆中应具有更高的 SiO_2 含量,因此其粘度相对于贫硅的碳酸岩要高。白云鄂博碳酸岩呈近EW向厚板状,在板状侵入体的两侧,由于快速的降温会造成高熔点矿物的大量结晶,形成晶粥,并使岩浆粘度进一步增大。上侵动力和粘滞性阻力的共同作用使边缘

相中先期结晶出的片状矿物(如黑云母)定向(平行于侵位接触面)形成明显的流动构造,因此,白云鄂博黑云母岩、富黑云母碳酸岩中黑云母的定向并非仅仅由变形作用形成,很可能是原生流动构造的一部分,这在岩石显微结构中也可得到证实。

赋矿碳酸岩H8由外向内具有一定的分带特征,由外向内分别为白云石碳酸岩、条带状富含磁铁矿和萤石的碳酸岩和富磁铁矿的碳酸岩。笔者最新的研究发现,碳酸岩的围岩H9中的黑云母岩、富黑云母碳酸岩也为碳酸岩的一部分,是碳酸岩边缘相的产物。碳酸岩岩相分带的发现为研究碳酸岩的岩浆演化提供了可能。前人对黑云母岩(黑云母板岩)、富黑云母碳酸岩(暗板板岩)的岩石化学结果表明,其稀土元素总量和轻、重稀土元素比值明显低于赋矿碳酸岩(张宗清等, 2003),表明碳酸岩边缘相中的黑云母、磷灰石等结晶可能造成了残余熔体中稀土元素,特别是轻稀土元素的进一步富集。基于碳酸岩岩相分带的认识,笔者认为,碳酸岩岩浆演化过程

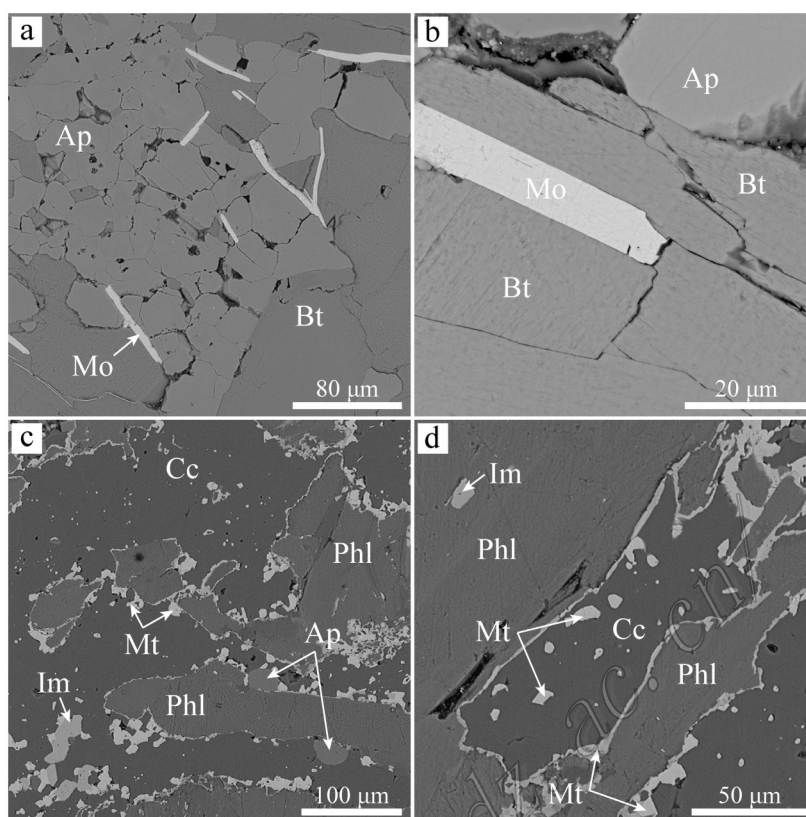


图 10 白云鄂博 H9 岩石单元不同岩性样品的背散射(BSE)电子图像

a, b. 富含磷灰石的黑云母岩; c, d. 富金云母碳酸岩

Bt—黑云母; Phl—金云母; Apt—磷灰石; Cc—方解石; Mt—磁铁矿; Im—钛铁矿; Mo—辉钼矿

Fig.10 Back-scattered electron (BSE) images of varied lithologies from H9 unit in Bayan Obo

a, b. Biotite type with high apatite content; c, d. Phlogopite rich carbonatite

Bt—Biotite; Phl—Phlogopite; Apt—Apatite; Cc—Calcite; Mt—Magnetite; Imt—Iimenite; Mo—Molybdenite

对白云鄂博成矿碳酸岩中稀土元素的富集和轻、重稀土元素的分异具有重要作用,但目前对碳酸岩浆演化过程中稀土元素的分异和富集机理研究较为薄弱。

(2) 岩石单元成因和岩相分带新认识对指导矿区及周边找矿的意义

白云鄂博矿区蚀变和变形复杂,这是造成矿床成因、成矿年代、矿区构造样式争议的主要原因。基于 H1~H7 和 H9 岩石单元主体为变质地层(变质沉积岩和变质火山岩)这一认识,前人提出了包括宽沟背斜、白云向斜等褶皱样式和向斜核部找矿的思路(袁忠信等,1991;柳建勇等,2006;章雨旭等,2012),但是,近年的勘查结果未证实白云向斜的存在,赋矿白云岩两侧的岩石单元并不完全对应(肇创,2014),不同岩石单元的重复出现可能不是褶皱

造成的。

笔者认为,矿区的 H1~H7、H9 岩石单元可能并非变质地层,因此,依据地层重复规律提出的宽沟背斜和白云向斜并不存在。白云鄂博碳酸岩具有一定的岩相分带,黑云母岩、富黑云母碳酸岩是碳酸岩体边缘相的表现,是岩浆演化的结果。岩相分带、岩浆演化控制了碳酸岩体侧向和垂向上的矿物组成和化学组成变化,因此,从碳酸岩的岩相分带的角度重新认识矿区的构造样式及赋矿碳酸岩的产状、空间分布、深部变化规律对指导矿区深部和外围找矿具有重要意义。另外,板岩在矿区普遍发育,除 H9 岩石单元外,还发育多个板岩岩石单元,如 H3 和 H5,对这些板岩岩石单元的成因仍需进一步研究,其可能为碳酸岩的同期产物,若果真如此,那么其深部的找矿潜力值得重视。

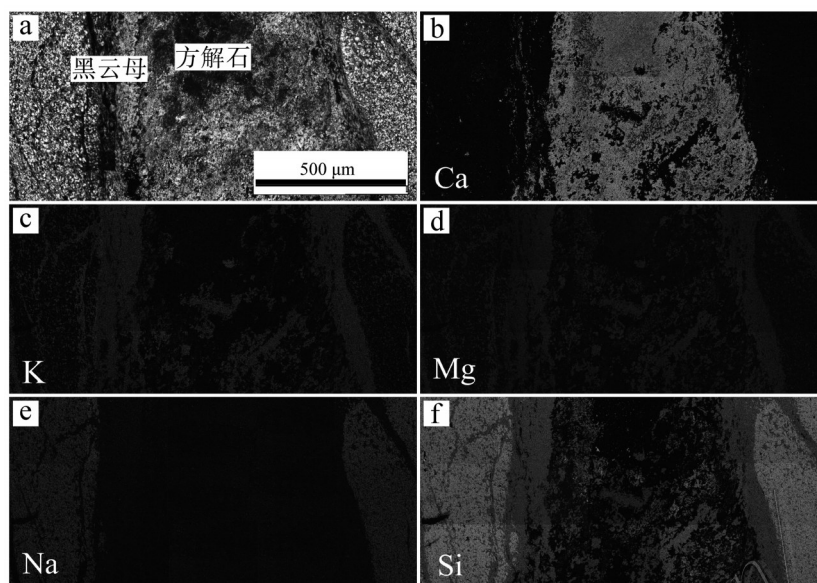


图11 白云鄂博H9岩石单元中碳酸岩细脉的显微镜下照片(a)和X射线扫描结果(b~f)

Fig 11 Micrography (a) and X-ray element mapping (b~f) of carbonatite vein in H9 unit of Bayan Obo

5 结 论

(1) 白云鄂博是世界第一大稀土矿床,其稀土资源量占目前世界已知稀土资源总量的三分之二以上,具有重要的资源战略地位。

(2) 白云鄂博研究历史悠久,研究者众多,在赋矿碳酸岩的成因、成岩成矿年代、稀土矿物学等方面取得一系列重要进展,为碳酸岩型稀土成矿理论发展做出了突出贡献。尽管对白云鄂博赋矿岩石的成因目前仍存在不同认识,但越来越多的地质、地球化学证据支持中元古代岩浆碳酸岩的成因观点。

(3) 白云鄂博经历了成矿后复杂的构造变形和热液蚀变,因此造成其矿床成因、成矿背景、成矿流体等方面尚存在不同认识,在碳酸岩岩浆演化、稀土元素富集和分异机理等方面研究尚较为薄弱,对稀土元素,特别是轻稀土元素超常富集的原因仍不清楚。

(4) 碳酸岩流体是白云鄂博稀土成矿的关键,但对碳酸岩流体出溶机理、成矿流体性质、流体演化过程研究仍有待深入。富 SO_4^{2-} 可能是碳酸岩型稀土矿床成矿流体的重要特征,且在稀土迁移中具有重要作用。

(5) 白云鄂博矿区出露的H1、H2、H9岩石单元可能并非前人认为的变质地层,应为岩浆侵入成因,

矿区其他前寒武纪岩石单元(H3~H7)的成因也值得商榷。基于矿区主要岩石单元为变质地层认识提出的矿区构造式样,如宽沟背斜和白云向斜可能并不存在,矿区的构造式样和成矿地质模型仍需进一步研究。

(6) H9中的黑云母岩、富黑云母碳酸岩是碳酸岩的组成部分,代表了碳酸岩的岩相分带,是碳酸岩岩浆演化的最好记录,碳酸岩岩浆演化过程对白云鄂博成矿碳酸岩中稀土元素的富集和轻、重稀土元素的分异具有重要作用。

致 谢 在野外工作中得到包头稀土研究院、包钢矿业有限责任公司、包钢集团巴润矿业有限责任公司的大力支持,在此一并致谢。

References

- Cao R L, Zhu S H and Wang J W. 1994. Material source and genesis of Bayan Obo Fe-REE deposit[J]. Chinese Science: Geoscience, 24 (12): 1298-1307 (in Chinese).
- Castor S B. 2008. The matic article rare earth deposits of North America[J]. Resource Geology, 58(4): 337-347.
- Chao E C T, Back J M, Minkin J A, Tatsumoto M, Wang J, Conrad J E, Makee E H, Hou Z, Meng Q and Huang S. 1997. The sedimentary carbonate-hosted giant Bayan Obo REE-Fe-Nb ore deposit of Inner Mongolia, China: A cornerstone example for giant polymetal-

- lic ore deposits of hydrothermal origin[J]. U.S. Geological Survey Bulletin, 2143: 65.
- Chen H, Qu X M, Xin H B and Jiang J H. 2010. A tentative discussion on the genesis of Ni-bearing carbonatites in Bangong Lake area, Tibet[J]. Mineral Deposits, 29(6): 1029-1042(in Chinese with English abstract).
- Cui H, Zhong R C, Xie Y L, Yuan X Y, Liu W H, Brugger J and Yu C. Formation of sulfate-rich crustal fluid and its ability of transporting rare earth elements[J]. Geology (under review).
- Dawson J B. 1964. Carbonatitic volcanic ashes in northern Tanganyika[J]. Bulletin Volcanologique, 27(1): 81-91.
- Diao N C. 1990. A study on isotope chronology of the Bayan Obo Group[J]. Regional Geology of China, 29(4): 353-359(in Chinese).
- D'Orazio M, Armienti P and Cerretini S. 1998. Phenocryst/matrix trace-element partition coefficients for hawaiite-trachyte lavas from the Ellittico volcanic sequence (Mt. Etna, Sicily, Italy)[J]. Mineralogy & Petrology, 64(1-4): 65-88.
- Doroshkevich A G, Veksler I V, Klemm R, Khromova E A and Izbrodin I A. 2017. Trace-element composition of minerals and rocks in the belaya zima carbonatite complex (Russia): Implications for the mechanisms of magma evolution and carbonatite formation[J]. Lithos, 284-285: 91-108.
- Fan H R, Xie Y H, Wang K Y, Tao K J and Wilde S A. 2004. REE daughter minerals trapped in fluid inclusions in the giant Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit, Inner Mongolia, China[J]. International Geology Review, 46(7): 638-645.
- Fan H R, Hu F F, Yang K F and Wang K Y. 2006. Fluid unmixing/immiscibility as an ore-forming process in the giant REE-Nb-Fe deposit, Inner Mongolian, China: Evidence from fluid inclusions[J]. Journal of Geochemical Exploration, 89(1): 104-107.
- Fan H R, Yang K F, Hu F F, Wang K Y and Zhai M G. 2010. Zircon geochronology of basement rocks from the Bayan Obo area, Inner Mongolia, and tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(5): 1342-1350(in Chinese with English abstract).
- Fan H R, Hu F F, Yang K F, Pirajno F, Liu X and Wang K Y. 2014. Integrated U-Pb and Sm-Nd geochronology for a REE-rich carbonatite dyke at the giant Bayan Obo REE deposit, northern China[J]. Ore Geology Reviews, 63(2): 510-519.
- Fan H R, Yang K F, Hu F F, Liu S and Wang K Y. 2016. The giant Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit, China: Controversy and ore genesis[J]. Geoscience Frontiers, 7(3): 335-344.
- Fei H C, Xiao R G and Hou Z Q. 2007. Iron oxides and its significance to genesis of Bayan Obo Fe-Nb-REE deposit of Inner Mongolia in China[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 25(3): 334-343(in Chinese with English abstract).
- Foley S F, Yaxley G M, Rosenthal A, Buhre S, Kiseeva E S, Rapp R P and Jacob D E. 2009. The composition of near-solidus melts of peridotite in the presence of CO₂ and H₂O between 40 and 60 kbar[J]. Lithos, 112: 274-283.
- Fu P Q and Su X Z. 1987. New Baiyuneboite-(Ce)-A new mineral[J]. Acta Mineralogica Sinica, 7(4): 289-297+385(in Chinese).
- Genge M J, Price G D and Jones A P. 1995. Molecular dynamics simulations of CaCO₃ melts to mantle pressures and temperatures: Implications for carbonatite magmas[J]. Earth & Planetary Science Letters, 131(3-4): 225-238.
- Hao Z G, Wang X B, Li Z, Xiao G W and Zhang T R. 2002. Petrological study of alkaline basic dyke and carbonatite dyke in Bayan Obo, Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 21(4): 429-444(in Chinese with English abstract).
- Hein J R and Koschinsky A. 2014. Deep-ocean ferromanganese crusts and nodules[M]. Treatise on Geochemistry (Second Edition), 13: 273-291.
- Hein J R, Spinardi F, Okamoto N, Mizell K, Thorburn D and Tawake A. 2015. Critical metals in manganese nodules from the Cook Islands EEZ, abundances and distributions[J]. Ore Geology Reviews, 68: 97-116.
- Hou Z L. 1989. The Bayan Obo Fe-Nb-REE deposit: Its basic geological features, metallogenesis and genetic model[J]. Geology and Prospecting, 27(5): 1-5+22(in Chinese).
- Hou Z Q, Liu Y, Tian S H, Yang Z M and Xie Y L. 2015. Formation of carbonatite-related giant rare-earth-element deposits by the recycling of marine sediments[J]. Scientific Reports, 5: 10231.
- Kato Y, Fujinaga K, Nakamura K, Takaya Y, Kitamura K, Ohta J, Toda R, Nakashima T and Iwamori H. 2011. Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements[J]. Nature Geoscience, 4: 535.
- Lai X D, Yang X Y and Sun W D. 2012. Geochemical constraints on genesis of dolomite marble in the Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit, Inner Mongolia: Implications for REE mineralization[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 57(57): 90-102.
- Lai X D, Yang X D, Liu Y L and Yan Z Q. 2016. Genesis of the Bayan Obo Fe-REE-Nb deposit: Evidences from Pb-Pb age and microanalysis of the H8 Formation in Inner Mongolia, North China Craton[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 120(15): 87-99.
- Le Bas M J, Keller J, Tao K J, Wall F, Williams C T and Zhang P S. 1992. Carbonatite dykes at Bayan Obo, Inner Mongolia, China[J]. Mineralogy and Petrology, 36(3): 195-228.
- Li W G, Li Q F and Jiang W D. 1996. Stratigraphy (Lithostratic) of Nei Mongol autonomous region: Multiple classification and correlation of the stratigraphy of China[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. 344 p(in Chinese with English title).
- Ling M X, Liu Y L, Williams I S, Teng F Z, Yang X Y, Ding X, Wei G J, Xie L H, Deng W F and Sun W D. 2013. Formation of the world's largest REE deposit through protracted fluxing of carbonatite by subduction-derived fluids[J]. Nature: Scientific Reports, (3): 1776.
- Ling M X, Zhang H, Li H, Liu Y L, Liu J, Li L Q, Li C Y, Yang X Y and Sun W. 2014. The Permian-Triassic granitoids in Bayan Obo, North China Craton: A geochemical and geochronological study[J]. Lithos, 190: 430-439.
- Liu J Y, Su S W, Zhang T R and Zhang Y X. 2006. A discussion on the

- practicability of prospecting in the deep part of the east mine and Kernel part of the Bayan syncline, Bayan Obo Ore field[J]. *Geological Review*, 52(6): 821-825(in Chinese with English abstract).
- Liu L S, Gao L, Du A D and Su Y L. 1996. The Re-Os isotopic age of molybdenite from Bayan Obo REE ore deposit[J]. *Mineral Deposits*, 15(2): 188-191(in Chinese with English abstract).
- Liu T G. 1985. Geological and geochemical character of Bayan Obo Rauhaugite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1(3): 15-28 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y, Bagas L, Nie F, Jiang S and Li C. 2016. Re-Os system of black schist from the Mesoproterozoic Bayan Obo Group, Central Inner Mongolia, China and its geological implications[J]. *Lithos*, 261: 296-306.
- Liu Y L, Yang G, Chen J F, Du A D and Xie Z. 2004. Re-Os dating of pyrite from giant Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit[J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(24): 2627-2631.
- Meng Q R. 1982. The genesis of the host-rock-dolomite of the Bayan Obo iron ore deposits and the analysis of its sedimentary environment[J]. *Geological Review*, 28(5): 481-489(in Chinese with English abstract).
- Meng Q R and Drew L J. 1992. Study on oxygen and carbon isotope and the implication for genesis of Bayan Obo ore-bearing H8 Dolomite[J]. *Contribution to Geology and Mineral Resources Research*, 7(2): 46-54 (in Chinese with English abstract).
- Migdisov A, Williams-Jones A E, Brugger J and Caporuscio F A. 2016. Hydrothermal transport, deposition, and fractionation of the REE: Experimental data and thermodynamic calculations[J]. *Chemical Geology*, 439: 13-42.
- Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. 2016. National mineral resources planning(2016~2020) [R]. (in Chinese).
- Miyawaki R, Shimazaki H, Shigeoka M, Yokoyama K, Matsubara S and Yurimoto H. 2011. Yangzhumingite, $\text{KMg}_{(2.5)}\text{Si}_{(4)}\text{O}_{(10)}\text{F}_{(2)}$, A new mineral in the mica group from Bayan Obo, Inner Mongolia, China[J]. *Eur. J. Mineral*, 23: 467-473.
- National geological data Museum (online material). <http://www.ngac.org.cn/>
- Ni P, Rankin A H and Zhou J. 2003. Fluid inclusion studies on carbonatite dyke and associated quartzite in Bayan Obo, Inner Mongolia, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(2): 297-306(in Chinese with English abstract).
- Orris G J and Grauch R I. 2002. Rare earth element mines, deposits, and occurrences[R]. U.S. Geological Survey. 3-174.
- Qin C J, Qiu Y Z, Zhou G F, Guo F, Wang Z G, Zhang T R and Xiao G W. 2007. Fluid inclusion study of carbonatite dykes/veins and ore-hosted dolostone at the Bayan Obo ore deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(1): 161-168(in Chinese with English abstract).
- Qiu Y Z. 1997. Thought on SHRIMP dating of Bayan Obo Mongazite[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 18(A00): 211-213(in Chinese with English abstract).
- Qu X M, Zhao Y Y, Wang R J, Li Y G, Xin H B, Dai J J, Jiang J H and Chen H. 2009. Discovery of magmatic nickel sulfide mineralizations in Bangong Lake-Nujiang metallogenic belt, Qinghai-Tibet plateau[J]. *Mineral Deposits*, 28(6): 729-736(in Chinese with English abstract).
- Ren Y C, Zhang Y C and Zhang Z Q. 1994. Study on heat events of ore-forming Bayan Obo deposit[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 29 (1-2): 95-101(in Chinese with English abstract).
- Shimazaki H, Miyawaki R, Yokoyama K, Matsubara S and Yang Z. 2008. Zhangpeishanite, BaFCl , A new mineral in fluorite from Bayan Obo, Inner Mongolia, China[J]. *Eur. J. Mineral*, 20: 1141-1144.
- Shimazaki H, Yang Z, Miyawaki R and Shigeoka M. 2010. Scandium-bearing minerals in the Bayan Obo Nb-REE-Fe deposit, Inner Mongolia, China[J]. *Resource Geology*, 58: 80-86.
- Smith M P, Henderson P and Campbell L S. 2000. Fractionation of the REE during hydrothermal processes: Constraints from the Bayan Obo Fe-REE-Nb deposit, Inner Mongolia, China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(18): 3141-3160.
- Smith M P, Campbell L S and Kynicky J. 2015. A review of the genesis of the world class Bayan Obo Fe-REE-Nb deposits, Inner Mongolia, China: Multistage processes and outstanding questions[J]. *Ore Geology Reviews*, 64(1): 459-476.
- Song W L, Xu C, Smith M P, Chakhmouradian A R, Brenna M, Kynicky J and Chen W. 2018. Genesis of the world's largest rare earth element deposit, Bayan Obo, China: Protracted mineralization evolution over-1b.y.[J]. *Geology*, 46(4): 323-326.
- The 109 Geological Brigade of Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources. 2009. Geological survey report of Maoniuping REE deposits in mianning County, Sichuan Province[R]. (in Chinese).
- Thi T N, Wada H, Ishikawa T and Shimano T. 2014. Geochemistry and petrogenesis of carbonatites from South Nam Xe, Lai Chau area, northwest Vietnam[J]. *Mineral Petrol.*, 108: 371-390.
- Twyman J D and Gittins J. 1987. Alkaline carbonatite magmas: Parental or derivative[J]? Geological Society London Special Publication, 30(1): 85-94.
- U.S. Geological Survey. 1996. Mineral commodity summaries 1996[R].
- U.S. Geological Survey. 1997. Mineral commodity summaries 1997[R].
- U.S. Geological Survey. 1998. Mineral commodity summaries 1998[R].
- U.S. Geological Survey. 1999. Mineral commodity summaries 1999[R].
- U.S. Geological Survey. 2000. Mineral commodity summaries 2000[R].
- U.S. Geological Survey. 2001. Mineral commodity summaries 2001[R].
- U.S. Geological Survey. 2002. Mineral commodity summaries 2003[R].
- U.S. Geological Survey. 2004. Mineral commodity summaries 2005[R].
- U.S. Geological Survey. 2006. Mineral commodity summaries 2006[R].
- U.S. Geological Survey. 2007. Mineral commodity summaries 2007[R].
- U.S. Geological Survey. 2008. Mineral commodity summaries 2008[R].
- U.S. Geological Survey. 2009. Mineral commodity summaries 2009[R].
- U.S. Geological Survey. 2010. Mineral commodity summaries 2010[R].
- U.S. Geological Survey. 2011. Mineral commodity summaries 2011[R].
- U.S. Geological Survey. 2012. Mineral commodity summaries 2012[R].
- U.S. Geological Survey. 2013. Mineral commodity summaries 2013[R].
- U.S. Geological Survey. 2014. Mineral commodity summaries 2014[R].
- U.S. Geological Survey. 2015. Mineral commodity summaries 2015[R].
- U.S. Geological Survey. 2016. Mineral commodity summaries 2016[R].
- U.S. Geological Survey. 2017. Mineral commodity summaries 2017[R].
- U.S. Geological Survey. 2018. Mineral commodity summaries 2018[R].

- Verplanck P L and Hitzman M W. 2016. Introduction: Rare earth and critical elements in ore deposits[J]. *Reviews in Economic Geology*, 18: 1-365.
- Wang J, Li S Q, Wang B L and Li J J. 1992. The Langshan-Bayan Obo rift system[M]. Beijing: Peking university Press(in Chinese).
- Wang J, Tatsumoto M, Li X, Premo W R and Chao E C T. 1994. A precise ^{232}Th - ^{208}Pb chronology of fine-grained monazite: Age of the Bayan Obo REE-Fe-Nb ore deposit: China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(15): 3155-3169.
- Wang K Y, Fan H R, Yang K F, Hu F F and Ma Y G. 2010. Bayan Obo carbonatites: Texture evidence from polyphase intrusive and extrusive carbonatite[J]. *Acta Geologica Sinica (English edition)*, 84(6): 1365-1376.
- Wang Y X, Qiu Y Z, Gao J and Zhang Q. 2003. Proterozoic anorogenic magmatic rocks and their constraints on mineralizations in the Bayan Obo deposit region, Inner Mongolia[C]. *Science in China (Series D)*, 46(s1): 26-40.
- Wendlandt R F and Harrison W J. 1979. Rare earth partitioning between immiscible carbonate and silicate liquids and CO_2 vapor: Results and implications for the formation of light rare earth-enriched rocks[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 69(4): 409-419.
- Woolley A R and Kjarsgaard B A. 2008a. Paragenetic types of carbonatite as indicated by the diversity and relative abundances of associated silicate rocks: Evidence from a global database[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(46): 741-752.
- Woolley A R and Kjarsgaard B A. 2008b. Carbonatite occurrences of the world: Map and database[J]. *Geological Survey of Canada, Open File 5796*.
- Xiao R G, Fei H C, An G Y, Zhang H C and Hou W R. 2003a. Lithology and genesis of dolomite in Baiyun'ebo mine, Inner Mongolia[J]. *Geoscience*, 17(3): 287-293(in Chinese with English abstract).
- Xiao R G, Shi S L, An G Y, Zhang H C and Fei H C. 2003b. Genetic characteristic of hydrothermal sedimentation of K-rich slate in Baiyun' Ebo Mine, Inner Mongolia[J]. *Geoscience*, 17(3): 281-286 (in Chinese with English abstract).
- Xie Y L, Hou Z Q, Yin S P, Dominy S C, Xu J H, Tian S H and Xu W Y. 2009. Continuous carbonatitic melt-fluid evolution for REE mineralization system: Evidence from inclusions in the Maoniuping REE deposit in western Sichuan, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 36: 90-105.
- Xie Y L, Li Y X, Hou Z Q, Cooke D R, Danyushevsky L, Dominy S C and Yin S P. 2015. A model for carbonatite hosted REE mineralization-the mianning-Dechang REE belt, western Sichuan Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 70: 595-612.
- Xie Y L, Hou Z Q, Goldfarb R, Guo X and Wang L. 2016. Rare earth element deposits in China[A]. In: Verplanck P L and Hitzman M W, eds. *Rare earth and critical elements in ore deposits*[C]. *Reviews in Economic Geology*, 18: 115-136.
- Xie Y L, Verplanck P, Hou Z Q and Zhong R C. 2019a. Rare earth element deposits in China: A review and some new understanding[J]. *Economic Geology Special Publication*, 21: (in press).
- Xie Y L, Qu Y W, Zhong R C, Verplanck P, Meffre S and Xu D X. 2019b. The -1.85 Ga carbonatite in North China and its implications on the evolution of the Columbia supercontinent[J]. *Gondwana Research*, 65: 125-141.
- Xu C, Kuang G X, Zeng L, Song W L, Deng M and Wei C W. 2019. Original depth of Paleoproterozoic carbonatites in North China Craton and onset of morden-styleplate tectonics[J]. *Earth Science*, 44(4): 1083-1095(in Chinese with English abstract).
- Xu J, Yang G G, Li G, Wu Z and Shen G. 2008. Dingdaohengite-(Ce) from the Bayan Obo REE-Nb-Fe mine, China: Both a true polymorph of perrierite-(Ce) and a titanite analog at the C1 site of chevkinite subgroup[J]. *American Mineralogist*, 93: 740-744.
- Yang K F, Fan H R, Hu F F and Wang K Y. 2010. Intrusion sequence of carbonatite dykes and REE accumulation mechanism in Bayan Obo district[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1523-1529(in Chinese with English abstract).
- Yang K F, Fan H R, Santosh M, Hu F F and Wang K Y. 2011a. Mesoproterozoic carbonatitic magmatism in the Bayan Obo deposit, Inner Mongolia, North China: Constraints for the mechanism of super accumulation of rare earth elements[J]. *Ore Geology Reviews*, 40(1): 122-131.
- Yang K F, Fan H R, Santosh M, Hu F F and Wang K Y. 2011b. Mesoproterozoic mafic and carbonatitic dykes from the northern margin of the North China Craton: Implications for the final breakup of Columbia supercontinent[J]. *Tectonophysics*, 498(1-4): 1-10.
- Yang X M, Yang X Y, Chen S X, Chen T H, Zhang P S, Tao K J, Le Bas M J, Wilson R N, Branson R, Campbell L S, Williams T C and Henderson P. 1999. New occurrence and mineralogy of Barium-Fluorocarbonate[J]. *Chinese Science Bulletin*, 44(9): 984-989 (in Chinese).
- Yang X M, Yang X Y, Chen T H, Zhang P S, Tao K J, Le Bas M J and Henderson P. 2000. Geochemical characteristics of a carbonatite dyke rich in rare earths from Bayan Obo: China[J]. *Journal of Rare Earths*, 18(1): 1-8.
- Yang X M, Yang X Y, Zheng Y F and Le Bas M J. 2003. A rare earth element-rich carbonatite dyke at Bayan Obo, Inner Mongolia, North China[J]. *Mineralogy and Petrology*, 78: 93-110.
- Yang X Y, Zheng Y F, Zheng Y F, Yang X M, Xu B L, Zhao Y B, Peng Y and Hao Z G. 2000. Carbon and oxygen isotope compositions of ore-bearing dolostone in the Bayan Obo deposit as well as two typical micrite mounds and a carbonatite Dyke[J]. *Acta Geologica Sinica*, 74(2): 168-180(in Chinese with English abstract).
- Yang Z M and Li H. 2007. New advances in the mineralogical study of the Bayan Obo ore deposit[C]. *The Chinese Society of Rare Earths, Seminar on Comprehensive Utilization of Rare Earth Resources and Environmental Protection in China*. 55-57(in Chinese).
- Yang Z Y. 1994. On the hot-water sedimentary origin of Dolomite-host rock of Bayan Obo deposits, Inner Mongolia, China[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 9(1): 39-42(in Chinese).
- Yao D, Zhang L J, Wiltshire J, Malahoff A and Ye Y G. 1998. Geology and meteorite impact origin of Bayan Obo Fe-Nb-REE deposit, Inner Mongolia, China[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 18(4): 87-96(in Chinese with English abstract).
- Yuan Z X, Bai G, Wu C Y, Zhang Z Q and Ye X J. 1991. Metallogenic

- epoch and genesis of the Bayan Obo Niobium-iron deposit, Inner Mongolia[J]. Mineral Deposits, 10(1): 59-60(in Chinese with English abstract).
- Yuan Z X, Bai G, Wu C Y, Ding X S and Zhang Z Q. 1995. Petrological features of volcanic rocks in H9 formation of the Bayan Obo ore district, Inner Mongolia, and their significance[J]. Mineral Deposits, 14(3): 197-205(in Chinese with English abstract).
- Yuan Z X, Bai G and Zhang Z Q. 2000. Trachytic rock and associated fenitization in the Bayan Obo ore deposit, Inner Mongolia, China: Evidence for magmatic-hydrothermal mineralization related to a carbonatitic complex[J]. Acta Geologica Sinica, 74(2): 148-153(in Chinese with English abstract).
- Yuan Z X. 2012. A further discussion on the metallogenic era and the genesis of the deposit of Bayan Obo deposit[J]. Acta Geologica Sinica, 86(5): 683-686 (In Chinese with English abstract).
- Zhai M G, Santosh M and Zhang L. 2011. Precambrian geology and tectonic evolution of the North China Craton[J]. Gondwana Research, 20(1): 1-5.
- Zhai M G and Santosh M. 2013. GR focus review metallogeny of the North China Craton: Link with secular changes in the evolving Earth[J]. Gondwana Research, 24(1): 275-297.
- Zhai M G, Hu B, Zhao T P, Peng P and Meng Q R. 2015. Late Paleoproterozoic-Neoproterozoic multi-rifting events in the North China Craton and their geological significance: A study advance and review[J]. Tectonophysics, 662: 153-166.
- Zhao C. 2014. Comparative study of East Jielegele and east ore body and their implication to Baiyun syncline based on geological profile survey of Bayan Obo mining area[J]. Mineral Deposits, 33 (Supp.): 161-162 (in Chinese).
- Zhang G L, Chen L H, Jackson M G and Hofmann A W. 2017. Evolution of carbonated melt to alkali basalt in the South China Sea[J]. Nature Geoscience, 10(3): 229-235.
- Zhang P S. 1958. Eschynite from Inner Mongolia, China[J]. Geological Review, 18(5): 360-364, 383(in Chinese with English abstract).
- Zhang P S, Tao K J and Li F H. 1981. Zhonghuacerite-A new rare earth mineral[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1(2): 65-73(in Chinese with English abstract).
- Zhang P S and Tao K J. 1983. New data for Cebaite[J]. Scientia Geologica Sinica, 4(4): 409-413(In Chinese with English abstract).
- Zhang P S. 1991. Study on the process mineralogy of large-sized Bayan Obo Fe-REE-Nb deposit[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 9(4): 350-353(In Chinese with English abstract).
- Zhang P S, Tao K J, Yang Z M, Yang X M and Song R K. 2001. Genesis of rare earths, Niobium and Tantalum minerals in Bayan Obo ore deposit of China[J]. Journal of The Chinese Rare Earth Society, 19(2): 97-102(in Chinese with English abstract).
- Zhang P S, Tao K J, Yang Z M, Yang X M and Song R K. 2002. Rare earths, niobium and tantalum minerals in Bayan Obo ore deposit and discussion on their genesis[J]. Journal of Rare Earths, 20(2): 81-86.
- Zhang Y X, Lü H B, Wang J, Liu J Y, Meng Q W and Huang M. 2012. Analysis of ore-forming tectonic settings of the Bayan Obo REE deposit[J]. Acta Geological Sinica, 86(5): 767-774(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z Q, Yuan Z X, Tang S H, Wang J H and Bai G. 1994. New data for ore-forming age of the Bayan Obo REE deposit, Inner Mongolia[J]. Acta Geoscientia Sinica, 29(1-2): 85-94(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z Q, Tang S H, Wang J H, Yuan Z X and Bai G. 2003. 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, 30(2): 130-137(in Chinese with English abstract).
- Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A and Li L Z. 1999. Tectonothermal history of the basement rocks in the western zone of the North China Craton and its tectonic implications[J]. Tectonophysics, (310): 37-53.
- Zhao G C, Sun M, Wilde S A and Li S Z. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited[J]. Precambrian Research, (136): 177-202.
- Zhou J B, Zheng Y F, Yang X Y, Shu Y, Wei C J and Xie Z. 2002. Paleoplate tectonics and regional geology at Bayan Obo in northern Inner Mongolia[J]. Geological Journal of China Universities, 8(1): 46-61 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Q and Wang S W. 2019. Discovery and significance of Permian Carbonate-REE mineralized alkaline complex in Panzhihua, Sichuan[N]. China Geological Survey Achievements News, 5(103-104): 45-49(in Chinese).
- Zhou Z L, Li G Y, Song T Y and Liu Y G. 1980. On the geological characteristics and genesis of the dolomitic carbonatites at Bayan Obo, Nei Mongol(Inner Mongolia)[J]. Geological Review, 26(1): 35-42(in Chinese with English abstract).
- Zhu X K and Sun J. 2012. Ore-forming epoch and episodes of REE mineralization in the Bayan Obo ore deposit, Inner Mongolia[J]. Acta Geoscientia Sinica, 33(6): 845-856(in Chinese with English abstract).
- Zhu X K, Sun J and Pan C. 2015. Sm-Nd isotopic constraints on rare-earth mineralization in the Bayan Obo ore deposit, Inner Mongolia, China[J]. Ore Geology Reviews, (64): 543-553.

附中文参考文献

- 曹荣龙, 朱寿华, 王俊文. 1994. 白云鄂博铁-稀土矿床的物质来源和成因理论问题[J]. 中国科学, 24(12): 1298-1307.
- 陈华, 曲晓明, 辛洪波, 江军华. 2010. 西藏班公湖地区含镍碳酸岩成因探讨[J]. 矿床地质, 29(6): 1029-1042.
- 刁乃昌. 1990. 白云鄂博群同位素地质年代学研究[J]. 地质通报, 29(4): 353-359.
- 范宏瑞, 杨奎峰, 胡芳芳, 王凯怡, 翟明国. 2010. 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, 26(5): 1342-1350.
- 费红彩, 肖荣阁, 侯增谦. 2007. 内蒙白云鄂博Fe-Nb-REE矿床铁氧化物对矿床成因的指示意义[J]. 中国稀土学报, 25(3): 334-343.
- 傅平秋, 苏贤泽. 1987. 新矿物——白云鄂博矿[J]. 矿物学报, 7(4): 288-297.
- 郝梓国, 王希斌, 李震, 肖国望, 张台荣. 2002. 白云鄂博矿区碱性基性

- 岩-碳酸岩岩墙岩石学研究[J]. 岩石矿物学杂志, 21(4): 429-444.
- 侯宗林. 1989. 白云鄂博铁-铌-稀土矿床基本地质特征、成矿作用、成矿模式[J]. 地质与勘探, 27(5): 1-5.
- 李文国, 李庆富, 姜万德. 1996. 内蒙古自治区岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 344页.
- 柳建勇, 苏胜旺, 张台荣, 章雨旭. 2006. 白云鄂博矿床东矿段深部及白云向斜核部探矿的可行性探讨[J]. 地质论评, 52(6): 821-825.
- 刘兰笙, 高翎, 杜安道, 孙亚莉. 1996. 白云鄂博稀土矿床中铪铌矿的铪-铌同位素年龄[J]. 矿床地质, 15(2): 188-191.
- 刘铁庚. 1985. 白云鄂博白云碳酸岩地质及地球化学特征——白云鄂博白云岩成因讨论[J]. 岩石学报, 1(3): 15-28.
- 孟庆润. 1982. 论白云鄂博铁矿含矿围岩——白云岩的沉积成因及其沉积环境分析[J]. 地质论评, 28(5): 481-489.
- 孟庆润, Drew L J. 1992. 内蒙白云鄂博“H8含矿白云岩”氧、碳同位素研究及其成因[J]. 地质找矿论丛, 7(2): 45-54.
- 倪培, Rankin A H, 周进. 2003. 白云鄂博地区碳酸岩墙及岩墙旁侧石英岩中的包裹体研究[J]. 岩石学报, 19(2): 297-306.
- 秦朝建, 裴榆卓, 周国富, 王中刚, 张台荣, 肖国望. 2007. 白云鄂博矿床碳酸岩墙/脉和赋矿白云岩中流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 23(1): 161-168.
- 裴榆卓. 1997. 白云鄂博独居石 SHRIMP 定年的思考[J]. 地球学报, 18(A00): 211-213.
- 曲晓明, 赵元艺, 王瑞江, 李佑国, 辛洪波, 代晶晶, 江军华, 陈华. 2009. 西藏班公湖-怒江成矿带发现硫化镍矿[J]. 矿床地质, 28(6): 729-736.
- 国家数字地质资料馆(网上资料). <http://www.ngac.org.cn/>
- 任英忱, 张英臣, 张宗清. 1994. 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, 29(1-2): 95-101.
- 四川省地矿局 109 地质队. 2009. 四川省冕宁县牦牛坪稀土矿区普查地质报告[R].
- 王榭, 李双庆, 王保良, 李家驹. 1992. 狼山-白云鄂博裂谷系[M]. 北京: 北京大学出版社.
- 肖荣阁, 费红彩, 安国英, 张汉成, 侯万荣. 2003a. 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, 17(3): 287-293.
- 肖荣阁, 史淑玲, 安国英, 张汉成, 费红彩. 2003b. 内蒙古白云鄂博矿区富钾板岩的热水沉积成因特征[J]. 现代地质, 17(3): 281-286.
- 许成, 匡光喜, 曾亮, 宋文磊, 邓森, 韦春婉. 2019. 华北古元古代碳酸岩起源深度及现代板块构造启动[J]. 地球科学, 44(4): 1083-1095.
- 杨奎锋, 范宏瑞, 胡芳芳, 王凯怡. 2010. 白云鄂博地区碳酸岩脉侵位序列与稀土元素富集机制[J]. 岩石学报, 26(5): 1523-1539.
- 杨晓勇, 章雨旭, 郑永飞, 杨学明, 徐宝龙, 赵彦冰, 彭阳, 郝子国. 2000. 白云鄂博赋矿白云岩与微晶丘和碳酸岩墙的碳氧同位素对比研究[J]. 地质学报, 74(2): 169-180.
- 杨学明, 杨晓勇, 陈双喜, 陈天虎, 张培善, Le Bas M J, Wilson R N, Branson R, Campbell L S, Williams T C, Henderson P. 1999. 白云鄂博铌稀土氟碳酸盐矿物的新产状及其矿物学特征[J]. 科学通报, 44(9): 984-989.
- 杨主明, 李禾. 2007. 白云鄂博矿物学研究新进展[C]. 中国稀土资源综合利用与环境保护研讨会.
- 杨子元. 1994. 论白云鄂博矿床含矿围岩-白云岩的热水沉积成因[J]. 地质找矿论丛, 9(1): 39-48.
- 姚德, 张丽洁, Wiltshire J, Malahoff A, 业渝光. 1998. 中国内蒙古白云鄂博 Fe-Nb-REE 矿床地质特征与陨石撞击成因[J]. 海洋地质与第四纪地质, 18(4): 87-96.
- 袁忠信, 白鸽, 吴澄宇, 张宗清, 叶笑江. 1991. 内蒙白云鄂博铌、稀土、铁矿床的成矿时代和矿床成因[J]. 矿床地质, 10(1): 59-70.
- 袁忠信, 白鸽, 吴澄宇, 丁孝石, 张宗清. 1995. 内蒙白云鄂博矿区 H9 中火山岩岩石特征及其意义[J]. 矿床地质, 14(3): 197-205.
- 袁忠信. 2012. 再谈白云鄂博矿床的成矿时代和矿床成因[J]. 地质学报, 86(5): 683-686.
- 张培善. 1958. 内蒙新发现的易解石[J]. 地质论评, 18(5): 360-364.
- 张培善, 陶克捷, 李方华. 1981. 中华铈矿 $\text{Ba}_2\text{Ce}(\text{CO}_3)_3\text{F}$ ——新发现的一种稀土矿物[J]. 矿物学报, 1(2): 65-73.
- 张培善, 陶克捷. 1983. 氟碳铈钡矿(Cebaite)的新资料[J]. 地质科学, 4(4): 409-413.
- 张培善. 1991. 白云鄂博超大型稀土-铁-铌矿床矿物学研究[J]. 中国稀土学报, 9(4): 350-353.
- 张培善, 陶克捷, 杨主明, 杨学明, 宋仁奎. 2001. 白云鄂博稀土、铌钽矿物及其成因探讨[J]. 中国稀土学报, 19(2): 97-102.
- 张宗清, 唐索寒, 王进辉, 袁忠信, 白鸽. 1994. 白云鄂博稀土矿床形成年龄的新数据[J]. 地球学报, 29(1-2): 85-94.
- 张宗清, 袁忠信, 唐索寒, 王进辉, 白鸽. 2003. 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, 30(2): 130-137.
- 章雨旭, 吕洪波, 王俊, 柳建勇, 孟庆伟, 黄敏. 2012. 白云鄂博矿床成矿构造环境分析[J]. 地质学报, 86(5): 767-774.
- 肇创. 2014. 白云鄂博矿区实测地质剖面东介勒格勒矿体与东矿对比及向斜构造初探[J]. 矿床地质, 33(增刊1): 161-162.
- 中华人民共和国国土资源部. 2016. 全国矿产资源规划(2016-2020年)[R].
- 周建波, 郑永飞, 杨晓勇, 舒勇, 魏春生, 谢智. 2002. 白云鄂博地区构造格局与古板块构造演化[J]. 高校地质学报, 8(1): 46-61.
- 周清, 王生伟. 2019. 四川攀枝花二叠纪碳酸岩-稀土矿化碱性杂岩的发现及意义[N]. 中国地质调查成果快讯, 5(103-104): 45-49.
- 周振玲, 李功元, 宋同云, 刘宇光. 1980. 内蒙古白云鄂博白云石碳酸岩的地质特征及其成因探讨[J]. 地质论评, 26(1): 35-41.
- 朱祥坤, 孙剑. 2012. 内蒙古白云鄂博矿床的稀土矿化时代与期次[J]. 地球学报, 33(6): 845-856.