https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.191



白云鄂博洋板块地质与成矿作用初探

肖庆辉1,刘 勇1,许立权2,丁孝忠1,张玉清2,程 杨3,李 岩3,范玉须4,贺国奇5

1. 中国地质科学院地质研究所,北京100037

2. 内蒙古自治区地质调查院,内蒙古呼和浩特010020

3. 中国冶金地质总局矿产资源研究院,北京 101300

4. 中国煤炭地质总局勘查研究总院,北京100039

5. 中国地质大学地球科学与资源学院,北京100083

摘 要:提出全球规模最大的白云鄂博稀土矿受亚洲洋向华北克拉通北缘俯冲的洋板块地质演化控制.探讨了白云鄂博地区 亚洲洋洋板块地质构造发育过程、亚洲洋向华北克拉通北缘俯冲过程中相继发育的新元古代,早、晚古生代俯冲增生杂岩带的 地质构造特征.探讨了白云鄂博稀土矿成因,认为稀土矿成矿碳酸岩岩浆产在华北克拉通北缘的所谓特殊的远端弧后构造环 境(far backarc settings),也有人称为远离弧后背景或者变形的大陆边缘环境(deformed continental margins),不在大洋俯冲过 程中发育的岩浆弧环境中.相对于大陆边缘弧,远端弧后构造环境位于向克拉通或向弧后更远的位置,它是控制白云鄂博深 部成矿物质向浅部地表运移聚集成大型矿床、矿集区的关键储运空间.远端弧后构造环境远离大洋汇聚带或俯冲带向大陆或 向弧后位置的克拉通边缘上,即在华北克拉通北缘岩石圈与亚洲洋造山带的岩石圈分界上的伸展构造中,受大规模岩石圈不 连续系统或深切岩石圈的断裂带系统控制.成矿碳酸岩岩浆可能来自携带大量铁与REE的亚洲洋洋壳沉积物,于晚元古一早 古生代向华北克拉通俯冲消减到华北克拉通陆下岩石圈地幔 SCLM 深循环过程中,在深切华北克拉通边缘的岩石圈的不连 续构造系统中出溶形成岩浆碳酸岩及其携带的REE矿床.

关键词: 洋板块地质兴蒙造山系;华北克拉通北缘;远端弧后构造环境、稀土矿成因;岩石圈的不连续构造;构造地质. **中图分类号:** P548 **文章编号:** 1000-2383(2020)07-2258-21 **收稿日期:** 2020-03-07

Preliminary Study on Geology and Mineralization of the Bayan Obo Ocean Plate

Xiao Qinghui¹, Liu Yong¹, Xu Liquan², Ding Xiaozhong¹,

Zhang Yuqing², Cheng Yang³, Li Yan³, Fan Yuxu⁴, He Guoqi⁵

- 1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 10037, China
- 2. Inner Mongolia Geological Survey Institute, Huhhot 010020, China
- 3. Institute of Mineral Resources, China Metallurgical Geology Administration, Beijing 101300, China
- 4. General exploration and Research Institute of China Coal Geology administration, Beijing 100039, China
- 5. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 10083, China

Abstract: This paper proposed that the world's largest Bayan Obo rare earth elements (REE) deposit is controlled by the geological evolution of the oceanic plate which subducted from the Asian Ocean towards the northern margin of the North China Carton (NCC). And discussed the geological tectonic development of the Asian Ocean plate in the Bayan-Obo region, and the

基金项目:地调"全国陆域及海区地质图件更新与共享"项目(No. DD20190370);内蒙古自治区地质矿产勘查基金(No.2017-YS01).

作者简介:肖庆辉(1939—),男,研究员,博士生导师,从事区域地质和大地构造以及花岗岩研究.ORCID:0000-0002-8539-7574. E-mail:qinghuixiao@126.com

^{*} 通讯作者:刘勇, E-mail:365639962@qq. com

引用格式:肖庆辉,刘勇,许立权,等,2020.白云鄂博洋板块地质与成矿作用初探.地球科学,45(7):2258-2278.

Neoproterozoic, Early and Late Paleozoic subduction-accretionary complex developed successively during the subduction of the Asian Ocean to the northern margin of the NCC. The origin of the Bayan Obo REE deposit is also discussed. It is believed that the REE-riched carbonatite magma is produced in the so-called special far backarc settings in the northern margin of NCC, which some people call it as far from the arc settings or deformed continental margins settings, instead of oceanic subduction settings (magma arc settings). Compared with the continental marginal arc, far backarc settings are located farther away from the carton or backarc, which is the key storage and transportation space that controls the migration and accumulation of deep ore-forming materials to shallow surface in Bayan Obo, and finally aggregates into large ore deposits and ore-concentrated area. The far backarc settings are far away from the oceanic subduction-convergence zone or subduction zone towards the carton or the carton edge behind the arc, that is, in the extension structure on the lithosphere boundary between the lithospheric boundary of the northern margin of the NCC and the Asian orogenic belt, it is controlled by a large-scale lithosphere discontinuous system or a deep-cut lithosphere fault zone system. The ore-forming carbonatite magma may come from the Asian oceanic crust sediments carrying a Large amount of Fe and REE. It subducted and subdued towards the SCLM deep circulation in the lower lithosphere of the NCC in the late Proterozoic-Early Paleozoic, then it dissolved to form magmatic carbonatites and the REE deposits in the discontinuous system which deep cutting the lithospheric edge of the NCC.

Key words: ocean plate geology, Xingmeng orogenic system; northern margin of North China Craton; origin of rare earth elements deposits, lithosphere discontinuous; far backarc settings; tectonics.

0 引言

白云鄂博位于华北克拉通北缘,与内蒙古古生 代亚洲洋板块俯冲增生造山带相邻,被克拉通与大 洋之间乌兰宝力格岩石圈不连续或大断裂隔开,北 为内蒙古亚洲洋大洋区,是一套含蛇绿岩的洋板块 地层沉积组合;以南至包头构造带为华北克拉通北 缘,白云鄂博地区位于克拉通边缘岩石圈不连续构 造带与洋板块俯冲增生杂岩带混杂过度地区,以拥 有全球规模最大的稀土矿而闻名于世.以往对它的 研究多集中在矿区地质及矿床成因方面,缺少系统 性和综合性的区域成矿地质背景研究.近十余年来 通过中、大比例尺区域地质填图调查研究,白云鄂 博地区在区域地质研究方面取得了重大进展:对华 北克拉通与西伯利亚克拉通之间的元古代一古生 代亚洲洋洋板块地质的形成与演化,亚洲洋洋板块 俯冲增生杂岩带、洋板块历次俯冲、对(带)的位置、 时限和方式,以及与新元古代一古生代洋板块演化 过程等一系列重要地质问题均取得了丰富的实际 资料和日趋一致的认识.本文将从洋板块地质演化 的视角,审视近期所取得的最新资料与研究成果, 探索白云鄂博地区洋板块地质演化形成的俯冲增 生杂岩的遗迹及其形成演化过程等,对白云鄂博地 区洋板块地质形成演化与成矿关系做初步的讨论, 为研究内蒙古中部地区元古代一古生代古亚洲洋 板块向华北克拉通北缘俯冲下插演化过程及其成 矿作用提供洋板块地质视角的新证据.

1 地质构造单元划分及其主要特征

据周建波等人(周建波等,2002)研究,白云鄂 博地区大地构造部位横跨两种性质完全不同的二 级构造单元(图1).以乌兰布拉格一呼吉尔图大断 裂为界,南为华北地块,北为华北板块北部早古生 代大陆边缘增生带.早古生代期间,由于古蒙古洋 板块的扩张、俯冲消减等,在大陆边缘形成了一套 较为典型的弧一盆体系及构造混杂带.根据地质专 题考察研究并结合前人的研究成果,白云鄂博及其 周边地区从区域上可划分为以下构造单元(图1): I.华北克拉通北缘;II.白云鄂博陆缘裂谷及陆缘 增生杂岩带(II-1.白云鄂博陆缘裂谷及陆缘 增生杂岩带(II-1.白云鄂博陆缘裂谷及陆缘 增生杂岩带(II-2.白云鄂博陆缘裂谷及陆缘

2 俯冲带(海沟)界线位置

传统槽台观,将白云鄂博地区划归华北地台内 蒙地轴西段轴缘坳陷,北邻内蒙海西地槽,二者以 乌兰布拉格断裂带为界.板块观将本区划归华北板 块北缘,界线定在白云鄂博北侧到西拉木伦河一带 (王鸿祯等,1990),具体地段为白云鄂博北侧约30 km处的乌兰布拉格大断裂为华北地台与内蒙海西 褶皱带分界线(张鹏远等,1993),根据此界线白云 鄂博应位于华北克拉通范围内.李春昱等根据零星 出露在中蒙边界一线为代表的呈东西向展布长约



图 1 白云鄂博地区区域构造地质简图

Fig.1 Regional tectonic geology of Bayan Obo area Ⅰ.华北克拉通北缘;Ⅱ.白云鄂博陆缘裂谷及俯冲增生杂岩带(Ⅱ-1.白云鄂博陆缘裂谷带;Ⅱ-2.白云鄂博陆缘俯冲增生杂岩带);Ⅲ. 早古生代俯冲增生杂岩带;Ⅳ.晚古生代亚洲洋对接封闭俯冲增生 杂岩带.断裂:①佘太一固阳断裂;②达茂旗一商都断裂;③白银角 拉克一宽沟断裂;④乌兰布拉格断裂;⑤包尔汗图断裂带;⑥ 索伦山—西拉木伦河断裂;据周建波等(2002)

200 km的超基性岩带及与之伴生的混杂堆积判断 为蛇绿岩,认为准索伦敖包一乌珠尔舒布特蛇绿岩 带是从元古代超大陆裂解形成横跨欧亚大陆的古 亚洲洋最后俯冲消失在华北克拉通陆块之下的界 线,称之为板块缝合带(李春昱和王荃,1983).自此 之后,这条重要的超基性岩带或蛇绿岩带,被认为 是两大板块碰撞相接所留下来的地缝合线.据此, 白云鄂博地区属华北古大陆板块与内蒙海西海洋 板块的结合带上.

尽管李春昱等把古亚洲洋最后俯冲消失界线 定在准索伦敖包一乌珠尔舒布特一线华北克拉通 陆块之下以来,大多数学者均认可这个古亚洲洋最 后俯冲消失界线,将白云鄂博归为华北克拉通北 缘.但也有人认为,古亚洲洋最后俯冲消失的缝合 带可能位于白云鄂博以南固阳一佘太一带,或者位 于阴山一燕山一带,将白云鄂博地区划归天山一兴 安地层区内蒙古草原地层分区,它是天山一兴安古 生代海槽的一部分.随着白云鄂博成矿作用研究的 深入,更多的人逐渐关注到古亚洲洋闭合过程对白 云鄂博成矿影响这一重要命题.这就需要识别古亚 洲洋最早俯冲消失界线定在哪里?

近十余年来,华北克拉通北侧的白云鄂博地区 通过中、大比例尺区域地质填图调查研究在区域地 质研究方面取得了重大进展,对华北克拉通与西伯 利亚克拉通之间的俯冲增生杂岩带、历次板块俯 冲、对接(带)的位置、时限和方式,以及元古代一 古生代洋板块地质的形成与演化等一系列重要地 质问题均取得了丰富的实际资料.本文依据沿白银 角拉克一宽沟断裂带分布的比鲁特蛇纹质混杂岩 带、呼和恩格尔堆积宽沟一白银角拉克辉长岩,以 及宽沟中、东白石山蓝片岩(蓝闪石类矿物为镁钠 闪石)密切伴生的构造混杂岩、高压变质带地体构 成的古俯冲带的重要标志划定宽沟一白银角拉 克一乌兰布拉格断裂带为古俯冲增生杂岩带.由于 宽沟一白银角拉克一乌兰布拉格断裂为标志,划定 经历了后期不同程度的变质、变形和变位,古俯冲 带的岩石原始状态的地质记录普遍不完整,成为制 约识别古俯冲增生杂岩带与早期陆壳增生过程的 因素.但是,根据该断裂带内成层無序地层组合,以 发育具有古板块俯冲形成的蛇绿混杂岩一叠瓦状 冲断层-紧闭同斜褶皱为特征俯冲增生杂岩带,以 及发育大量岩块与基质等俯冲增牛杂岩带地质记 录特点,虽然俯冲带不完整,仍可以初步认为,白云 鄂博地区存在古俯冲带残余遗迹,它们是新元古 代一古生代古亚洲洋洋板块最早俯冲消失于华北 克拉通北侧的俯冲增生杂岩带,是古亚洲洋最早俯 冲于华北克拉通北侧的大洋板块转换形成大陆的 海沟前沿地区,其界线初步大约定在宽沟一白银角 拉克一乌兰布拉格断裂带内及其之间,并将它初步 命名为宽沟一白银角拉克一乌兰布拉格古亚洲洋 洋板块初始俯冲增生杂岩带.该初始俯冲增生杂岩 带由比鲁特蛇绿混杂岩带、乌德岛弧混杂岩系统、 恩格尔辉长-闪长岩陆缘弧系统等构造单元构成. 其中,宽沟一白银角拉克与乌兰布拉格断裂带之间 外俯冲增生杂岩带是迄今为止白云鄂博地区保存 较好、发育比较完全的典型俯冲增生杂岩带之一. 虽然乌兰布拉格俯冲增生杂岩带不典型,一般表现 为韧性剪切带,但断裂带活动具有长期性和继承性 特点,又由于恰好位于本区地质和地球物理场的分 界线,控制了本区南北两侧的沉积建造、岩浆活动、 构造变动和内生矿床等地质体的时空分布,是华北 克拉通北缘的重要边界构造界线之一,为此我们把 乌兰布拉格断裂与宽沟一白银角拉克断裂组合在 一起作为古俯冲增生杂岩带.该俯冲增生杂岩带包 括成分复杂的不同性质、不同时代的外来岩块和原 地岩块.外来岩块是与增生杂岩主体不同时代、不 同成因的岩块.有代表洋壳的比鲁特蛇纹石化辉橄 岩及呼和恩格尔堆积辉长岩、辉石玄武岩等堆积杂 岩;代表低温高压变质带的蓝闪片岩等,原地岩块 为白云鄂博群各组岩石岩块与围岩为断层接触,各 岩块是沿断裂构造侵位的,岩块大小不一,形状各 异.比鲁特蛇纹质辉石橄榄岩块呈凸镜状或球状,

岩块和基质均遭受不同级别的剪切,增生杂岩带分 布在特定的构造部位,形成在俯冲板块前缘的叠瓦 状构造带上.

可见,白云鄂博处于大洋板块转换形成大陆俯 冲增生杂岩带的克拉通边缘的陆缘构造关键构造 单元,白云鄂博成矿作用受大洋板块转换形成大陆 的俯冲增生作用控制,要想研究白云鄂博俯冲增生 杂岩带的俯冲增生作用及其成矿作用,仅仅局限在 白云鄂博图幅内是不够的.在乌兰布拉格两缘侧, 比鲁特蛇绿混杂岩带、乌德岛弧系统杂岩体、恩格 尔辉长一闪长杂岩体陆缘弧(张鹏远等,1993;周建 波等,2002),均以构造杂岩的岩块出露,这些构造 岩块与古亚洲洋闭合的关系如何,可能是解开研究 白云鄂博大地构造环境争论的一把钥匙.

3 白云鄂博地区俯冲增生杂岩杂岩 带主要证据与特征

对白云鄂博地区的野外地质调查表明,沿白银

角拉克一宽沟一乌兰保力格近东西向断裂带(白银 角拉克一宽沟一乌兰保力格岩石圈不连续带)是白 云鄂博地区古亚洲洋由北向南即向华北克拉通北 缘俯冲消减的俯冲带,即海沟带(图2). 它是古亚洲 洋在白云鄂博地区发生向华北克拉通北缘俯冲消 减形成的第一个华北克拉通陆缘俯冲增生杂岩带. 白云鄂博群在白银角拉克一宽沟一乌兰保力格断 裂南北两侧存在明显差异,白银角拉克一宽沟断裂 以南可见到白云鄂博群岩石不整合覆盖在相当于 五台群的色尔腾山群之上,说明白云鄂博群是发育 在华北克拉通基底之上的裂谷沉积.而白银角拉 克一宽沟一乌兰保力格断裂以北白云鄂博群却呈 增生杂岩形式产在华北克拉通北缘,形成了华北克 拉通北缘的陆缘俯冲增生杂岩带.这些俯冲增生杂 岩带受后期亚洲洋多次俯冲消减碰撞而发生了强 烈变形与肢解,目前己发现被肢解过的主要俯冲增 生杂岩带如下:



图 2 华北克拉通北缘残留的俯冲增生杂岩带

Fig.2 Remaining subduction accretionary complex zone in the northern margin of North China Carton Ⅰ. 乌德岛弧岩漿系统俯冲增生杂岩;Ⅱ.比鲁特蛇绿俯冲增生杂岩;Ⅲ.呼和恩格尔陆缘弧俯冲增生杂岩;Ⅳ.1:5万白云鄂博幅范围

3.1 比鲁特蛇绿混杂岩

蛇绿混杂岩主要分布在白云鄂博地区沿白银 角拉克一宽沟断裂的白云鄂博群比鲁特组地层中, 故又称比鲁特蛇绿混杂岩(图2).内蒙古区测一队 认为,该蛇绿混杂岩是加里东期超基性侵入体,之 后李继亮等(李继亮和胡辅佑,1981)认为是白云鄂 博群中的蛇纹质滑塌堆积;张鹏远等(1993)对其进 行过详细的研究之后认为属蛇纹质混杂岩.野外调 杳及资料表明,该混杂岩带以蛇纹质角砾岩为代 表,总产状 340°/35°~37°. 混杂岩带北部为蛇纹质 混杂岩,主要岩性为角砾状蛇纹石化橄榄岩、含辉 橄岩碎屑的灰岩、泥质板岩角砾岩等:其南部为砂 泥质滑混堆积.比鲁特混杂岩带内的成分复杂,岩 块大小不一,形态各异,可分为外来岩块和原地岩 块两部分.外来岩块包括代表洋壳残片的比鲁特蛇 纹石化辉橄岩和堆积辉长岩,以及代表低温高压变 质带的蓝片岩,比鲁特蛇纹质辉石橄榄岩块呈凸镜 状或球状;原地岩块主要为白云鄂博群岩石组合, 包括哈拉霍格特组灰岩,比鲁特组深海硅质岩以及 具有波痕构造的滨海相都拉哈拉组砂岩等. 它们的 基质主要为比鲁特组砂泥质岩石,岩块和基质之间 均遭受不同级别的构造剪切. 岩块与基质主体具有

不同时代、不同成因,说明岩块与基质之间是经过 强烈构造作用构造混杂在一起的.岩石化学分析表 明,蛇纹石化橄榄岩的岩石化学成分接近于地幔岩 的化学成分,稀土配分特点多属平坦型,与大洋玄 武岩平均值一致.这些特征说明,比鲁特蛇纹石化 橄榄岩是蛇绿混杂岩,是沿白银角拉克一宽沟断裂 发育的以蛇纹岩为代表的蛇绿混杂岩,它们是被洋 板块刮削下来的洋壳残片以及陆缘沉积物,是该区 存在洋板块俯冲消减构造的重要标志.

3.2 乌德岛弧岩浆系统

岛弧岩浆系统是洋板块的洋壳俯冲消减下插 发生重熔形成的岩浆,上升侵入一喷溢在上覆板块 直接形成的火山一侵入杂岩,它记录并反映了洋板 块俯冲活动的踪迹,是识别、划分洋板块是否发生 过俯冲消减下插活动的基本标志之一,也是判断混 杂岩是否是洋壳俯冲消减下插发生重熔形成的岩 浆产物.乌德岛弧岩浆系统发育在华北克拉通北 缘,由发育有洋壳残片的黑砂图火山弧、红旗牧场 TTG前锋岩浆弧、乌德岛弧岩浆混杂岩带以及红旗 牧场弧后盆地、与洋板块向华北克拉通北缘俯冲作 用有关的呼和恩格尔岛弧杂岩体构成(图2、图3).



图 3 白云鄂博地区乌德岛弧岩浆系统混杂岩带略图

Fig.3 Sketch map of mixed magmatic zone of arc magmatic system in Ude Island, Bayan Obo area 1.二连组; 2.李三沟组; 3.阿木山组; 4.查干哈布组; 5.西别河组; 6.呼和艾力更组; 7.哈拉组; 8.布龙山组; 9.阿牙登组; 10.三叠纪石英闪长岩; 11.奥陶纪石英闪长岩; 12.乌德构造混杂带; 13.混杂带构造岩块; 14.正断层; 15.逆断层; 16.乌兰布拉格一呼吉尔图大断裂; 贾和义等(2003); 尚恒胜等(2003)

3.2.1 黑砂图火山弧 黑砂图火山弧的岩石由中、 下奥陶统包尔汗图群布龙山组、哈拉组及晚奥陶世 巴特敖包岩石系列组成.岩性系列以火山岩为主 体,碎屑沉积岩次之.包尔汗图群的下部(布龙山 组)为一套火山一碎屑沉积岩建造,主要由含火山 碎屑的杂砂岩、深水硅质岩夹安山岩、英安岩、细碧 岩等组成.包尔汗图群上部(哈拉组)则以玄武岩、 细碧岩、安山岩、流纹岩等火山熔岩为主,夹少量火 山碎屑岩.岩石组合及成分表明,该岩石系列组成 以中基性熔岩占绝对优势,而中酸性熔岩次之.最 常见的火山岩类型是安山岩,多为斑状结构,但也 存在无斑安山岩.这种岩石组合与活动大陆边缘带 和大多数岛弧区是一致的.

组成黑砂图火山弧的包尔汗图群火山岩岩石 化学氧化物的含量有规律的变化,玄武岩、安山质 火山岩的 SiO₂由下而上渐减,其 CaO 和 MgO Σ FeO减少, TiO₂、Al₂O₃、Na₂O、K₂O增加, 某些微量 元素 Ni、Cr、V减少, 而 Y 随之增加.这些元素含量 有规律的变化特征表明,在包尔汗图火山岩喷发过 程中结晶分异作用起主要作用.火山岩的化学组分 呈连续性有规律的变化:先晶出的高温基性矿物使 岩浆中的 MgO、CaO、∑FeO、Ni、Cr、V含量明显减 少了,而残留液体中则愈来愈富硅、碱质,同时也使 残留体中Ti、Y等不相容元素相应增加.引起钙碱 性火山岩浆成分呈极性变化,也与洋板块俯冲带内 岩浆发生的深度有关.岩石化学投图表明,包尔汗 图群火山岩是一套钙碱系列的细碧岩-安山岩-流纹岩组合.具有低TiO2和高K2O的岩石化学特 征.据NaO/K2O-Na2O和Ti/Cr-<FeO>/MgO图 表明,包尔汗图群火山岩具岛弧成因的特点.该岛 弧的初始形成阶段可能为洋一洋俯冲的水下洋内 初始岛弧,为具有一定厚度的洋壳,随着亚洲洋壳 不断俯冲下插消减,水下火山岛弧露出水面,并日 渐成熟,在晚奥陶世则形成较完整的弧盆沉积体系.

总之,在古生代早寒武世,本地亚洲洋处于洋 盆扩张环境,形成东西向洋盆,并生成超铁镁质洋 壳.到早奥陶纪,洋盆由扩张转变为俯冲挤压环境, 亚洲洋洋壳俯冲下插形成岛弧火山的喷发及岛弧 岩浆岩的侵入.晚奥陶世一早志留世,弧后洋盆扩 张彻底破坏了岛弧的完整性而变成今日的岛弧残 块,并与宝音图岩群(都荣敖包陆块)共同组成早古 生代白银角拉克-宽沟断裂-乌兰保力格俯冲增 生杂岩带.随着亚洲洋的不断俯冲消减,华北克拉 通的北缘不断增生及洋盆后撤的退缩,一直到早志 留世结束了本区早古生代的洋一洋俯冲的洋内造 山作用.

3.2.2 红旗牧场TTG岩浆前锋弧 红旗牧场TTG 岩浆前锋弧是以奥陶纪TTG侵入岩组合构成的亚 洲洋壳俯冲下插消减最先形成的奥陶纪岩浆系统 的岛弧,一些岛弧侵入岩则由奥陶纪闪长岩、石英 闪长岩以及斜长花岗岩系列组成.在混杂岩带内该 系列TTG岩石多数已呈混杂带中的岩块以及碎裂 岩、糜棱岩构成的基质部分出现,少数呈大型断块 岩体裸露分布在混杂带中(图4).侵入岩块稀土元 素 dEu 值在 0.8~1.0,显示出弱 Eu 亏损, \(\sum \Sc}\) Yb 在 5.0~17.2间,反映出从中性到酸性岩石的演化特 征.铈族稀土含量增高, 钇族稀土含量减少, 轻重稀 土从分馏不明显向分馏明显过渡.

3.2.3 红旗牧场弧后盆地 红旗牧场弧后盆地位 于红旗牧场 TTG 岩浆前锋弧南侧. 由于遭受后期 多次俯冲造山作用构造破坏、肢觧、岩浆岩侵入以 及地层掩盖,目前弧后盆地出露出面积较小,残缺 不全.主要由奥陶纪呼和艾力更组石英岩、变质粉 细砂岩、绿泥片岩、绿泥二云母片岩、粉砂质板岩、 硅质板岩等组成.变质相属低绿片岩相.原岩为一 套细碎屑岩、火山岩建造,厚度大于608m.从下至 上的岩相沉积顺序为陆棚相一海底火山喷发相一 泻湖相-滨岸相,构成了向上变浅的沉积序列.该 套岩石的物质主要来源于附近大陆边缘的剥蚀区, 其中也夹杂一定数量岛弧成分的碎屑物质. 沉积盆 地岩相展布具不对称性,即具复理石建造的碎屑岩 靠近陆缘发育,而砂泥质岩石和火山岩则发育在盆 地的中心.根据俯冲增生杂岩带的岩石组合类型、 岩浆演化特点、地球化学特征及侵位机制等方面分 析,混杂岩带中的超基性岩块如橄榄岩、玄武岩等 是洋壳俯冲作用的产物.

弧后盆地岩石变形强烈,多构成层间对顶尖棱 状小褶皱.由于受顺层剪切作用,绿泥片岩中发育 大量的"舌"状鞘褶皱,线理发育,主要由绿泥石等 粒状矿物的定向拉伸而成,线理向210°倾伏,与"舌" 状鞘褶皱的枢纽平行.表明岩石经过强烈的韧性剪 切作用."舌"状鞘褶皱代表了剪切作用形成的a形 褶皱,线理代表了剪切作用形成的a形线理.它们的 形成时间与弧后的弧间扩张和消减应该是一致的, 应为晚奥陶世.

该弧后小洋盆从生成、发展到消亡,经历了奥

陶纪全过程,奥陶纪早中期是盆地的形成时期,接 受碎屑岩及火山岩的沉积;晚期经历了一次弧后扩 张、消减作用,沿红旗牧场 TTG 前锋岩浆弧向下俯 冲消减,造成乌德构造岩浆混杂带.弧后洋盆的闭 合始于早中志留世,止于晚志留世.上志留统西别 河组与包尔汗图群的不整合表明,早古生代弧一盆 构造体系的演化结束,形成了早古生代华北克拉通 北缘俯冲增生杂岩带.

3.2.4 乌德岩浆构造混杂岩带 本地区一些俯冲 岛弧花岗岩常作为俯冲增生混杂岩带的基质存在, 作为基质的俯冲岛弧花岗岩把大量本地岩浆岩块, 外来岩块、洋壳残片捕获进来,外观上看类似顶垂 体(图4、图6).李继亮将此类产于岩浆弧基质中的 增生混杂体称之为增生弧大地构造相.我们则把它 称为俯冲岩浆构造混杂岩带,强调其是俯冲岩浆侵 入的动力以及俯冲引发的大规模逆掩作用的外部 构造推挤而形成的岩浆构造混杂岩,不是顶垂体或 捕虏体,这些岩浆岩块,外来岩块是经过俯冲岩浆 动力构造与俯冲引发的大规模逆掩作用破坏、肢 解、搬运形成的岩浆构造混杂岩带,它是一种由俯 冲岩浆构造作用引发的大规模的逆掩作用的外部 构造推挤而形成的新类型的构造混杂岩带,我们把 它称为岩浆构造混杂岩带.乌德岩浆构造混杂岩带 就是一个典型实例.

乌德岩浆构造混杂岩带分布于白云鄂博地区 西北竹力开一带,走向北西一南东,宽处可达2km, 窄处有百余米.总长度约20km.是由奥陶纪闪长岩 体及其中的不同时代、不同岩性、不同构造特征的 异地岩块、原地岩块、和基质3部分组成的岩浆构造 杂乱堆积体(图5).这些杂乱堆积体外观上酷似侵 入岩体中的捕虏体,但仔细观察却发现杂乱堆积体 基本由异地岩块、原地岩块和基质3部分组成.异地



图 4 由大规模的逆掩作用的外部构造推挤而形成的岩浆构造混杂岩带(据贾和义等, 2003) Fig.4 Magmatic tectonic mixed zone formed by large-scale overthrusting external tectonic pushing(modified from Jia *et al.*, 2003)



图 5 乌德岩浆构造混杂带中(局部)不同时代、不同岩性构造岩块混杂分布

Fig.5 Miscellaneous distribution map of different ages and different lithologic tectonic blocks in the Ude magmatic tectonic hybrid zone 1. 第四系; 2. 下白垩统李三沟组; 3. 下泥盆统查干哈布组; 4. 中下奧陶统布龙山组; 5. 中下奧陶统哈拉组; 6. 古元古界宝音图岩群; 7. 奧陶纪闪 长岩; 8. 超基性岩; 9. 片理产状; 据贾和义等(2003); 据比例尺1: 250 000(白云鄂博) 幅区域地质调查报告



1.晚古生代黑云母花岗岩;2.晚古生代钾质花岗岩;3.晚古生代片麻状花岗岩;4.晚古生代花岗闪长岩;5.白云鄂博群尖山组;6.白云鄂博群比 鲁特组;7.白云鄂博群哈拉霍格特组;8.白云鄂博群都拉哈拉组;9.呼和恩格尔杂岩体;10.逆断层;11.不整合;12.第四系;13.杂岩体

岩块来自与岩浆构造混杂带主体无关的其他岩石 或地层,是由大规模的逆掩作用,从岩浆构造混杂 体外部构造推挤楔入而来的.因而在时代、岩石组 合等方面都与原地成分往往有较明显的差异(图 5). 异地岩块有:橄榄岩、蛇纹岩、层状辉长岩、橄榄 辉长岩、角闪石岩、辉石玄武岩、斜长岩、阳起石岩、 滑石片岩;具结晶基底性质的宝音图岩群的大理 岩、斜长黑云石英片岩、二云石英片岩、片理化斜长 变粒岩、斜长角闪岩白云质灰岩等.基质则由晚奥 陶世的碎裂石英闪长岩、细粒闪长岩及超铁镁质碎 裂蛇纹石化橄榄岩等组成.岩石强烈破碎,蛇纹石 化、滑石化极为发育.经强烈构造动力的改造,强烈 构造挤压破碎成极为细小的碎屑物质,有些则以柔 流的形式充填于混杂岩块之间.原地岩块有:包尔 汗图群布龙山组的深水硅质岩、复理石钙质变质粉 砂岩;哈拉组安山岩、细碧岩、碎裂安山玄武岩、蚀 变无斑安山岩;中下奥陶统呼和艾力更组中粗粒石 英岩、粉砂质板岩、含燧石条带泥岩、二云片岩等.

乌德岩浆构造混杂岩带的特点可归纳如下 几点:

(1)岩浆岩体中的混杂岩组分复杂,由不同性质、不同时代的外来岩块、原地岩块和基质3部分组成.它们分别来自华北克拉通边缘的基底碎块、洋盆基底超铁镁质岩石以及火山岛弧及弧后盆地的

岩石碎块.

(2)岩浆岩体中的岩块大小不等,形态各异.岩 块差异甚为悬殊,形状呈不规则状、透镜状、长条状 为主,大到几百平方米,小到几十平方厘米或几平 方厘米.整个混杂岩带延伸很长,分布有宽有窄.有 的在十几平方米的范围内就可见到几种不同的岩 石混杂在一起.

(3) 基质和岩块都普遍遭受过不同级别的构造 剪切、碾滚、构造拉断形成石香肠、菱形体、楔状体、 不规则柔褶等.它们之间多以构造断裂或剪切构造 面为界,均为构造接触.同一岩块在横向上具有不 连续性.

(4)空间分布在特定的构造部位,基本沿弧后 盆地与火山岛弧二者界线分布,形成于弧后扩张消 减带的前端.它的展布基本上代表了弧后盆地的俯 冲消减位置.

3.3 与洋板块向华北克拉通之下俯冲作用有关的 呼和恩格尔岛弧杂岩体

呼和恩格尔岛弧杂岩体位于白云鄂博地区白 音朱日和苏木附近,西距比鲁特杂岩体大约30km (图2、图7、图8).该岩体受白银角拉克一宽沟断裂 带控制,长4000m,宽300m,呈凸镜状产出.岩体 由辉长岩和斜长岩互层组成的层状岩体.斜长岩宽 5~10m,浅色,在岩体中呈棱状突起;辉长岩宽度 30~80 m. 两者组成韵律层. 该杂岩体东西4 km,宽 0.3~1.0 km,与围岩白云鄂博群尖山组走向近于平 行,两者未见到侵入接触关系(图6). 杂岩体以闪长 岩为主,闪长岩内部包含几个小规模的角闪辉长岩 和角闪橄榄岩,长宽仅数十米. 在空间上具有由中 心向外依次出现角闪橄榄岩、角闪辉长岩和闪长岩 分布特征环状杂岩体.

恩格尔杂岩体边部岩石均强烈片理化,与围岩 片理化方向一致,表明杂岩体和围岩同时受到剪切 作用.根据前人对呼和恩格尔详细的岩石学和地球 化学研究,恩格尔杂岩体具有以下特征:

3.3.1 杂岩体组成与岩石学特征 角闪橄榄岩:灰绿色,块状构造,中细粒结构,主要由橄榄石和角闪石组成.自形橄榄石全部蛇纹石化,可见橄榄石假象,有磁铁矿析出.角闪石自形至半自形,以棕色为主,长者可达5mm,含量约30%左右.沿解理有铬铁矿析出,定向排列.部分角闪石包裹橄榄石,具异补堆晶结构.

角闪辉长岩:黑绿色,块状构造,中细粒结构. 矿物成分主要为角闪石、斜长石和单斜辉石.角闪 石含量30%~40%,主要有棕色和绿色两种.晶体 1~4 mm.斜长石呈自形板条状,粒径约0.2~1.0 mm,为培-钙长石,大部分被绢云母、次闪石、黝帘 石所交代.单斜辉石呈自形至半自形,板柱状,粒径 0.5~1.3 mm.大部分被阳起石化呈辉石假象产出.

闪长岩:是杂岩体主体岩石.浅灰色、块状构造,中细粒结构.主要由斜长石(60%)、角闪石(20%)和黑云母(15%)组成,含有少量石英.斜长石为中长石.矿物多为自形晶至半自形晶,镶嵌结构,部分斜长石自形,粒径5mm.

3.3.2 岩石地球化学分析呼和恩格尔杂岩体的 角闪石橄榄岩具有高TFe₂O₃(16.1%~20.3%),低 SiO₂(36.08%~38.08%)、低 MgO(19.31%~ 25.88%)的特点.Mg[#]在73.7~75.8,为富铁质的橄 榄岩类.该杂岩体遵循钙碱性的演化趋势,与产于 造山带中钙碱性玄武岩一安山岩类似.角闪橄榄岩 和角闪辉长岩稀土总量均很低(∑REE=19.30~ 25.75),闪长岩的稀土总量相对较高(∑REE= 159.19~169.78).稀土配分曲线相似,呈比较平坦 的右倾配分模式.具有不同程度Ce负异常.与岛弧 型钙碱性火山岩特征相似.微量元素表现为Bu、U、 K、La、Sr、Sm等元素富集,Nb、Ta、Zr、Hf明显亏损,



图 7 呼和恩格尔杂岩体露头照片 Fig.7 Hoh Engel complex outcrop photos 混杂在变质石英砂岩地层中的辉长岩、角闪岩岩块,构造接触;据尚 恒胜等(2003)



图 8 呼和恩格尔杂岩中的角闪辉长岩块和闪长岩透镜体 Fig.8 Angle diorite blocks and diorite lens bodies in the Hoh Engel complex

据尚恒胜等(2003)

也跟钙碱性火山弧玄武岩地球化学特征相吻合.

综合分析认为,呼和恩格尔杂岩体属于橄榄 石一闪长岩型杂岩,产于岛弧或者活动大陆边缘环 境,与洋板块向大陆之下的俯冲作用有关.随着洋 板块俯冲持续下插,被刮削下来的构造岩块逐渐向 大陆拼贴,导致板块俯冲带向背离大陆方向迁移, 依次形成了呼和恩格尔一比鲁特俯冲增生杂岩一 乌德俯冲岩浆构造杂岩.这可能表明古生代华北克 拉通与西伯利亚克拉通汇聚过程中,亚洲洋洋壳已 经俯冲到白云鄂博地区下部,将白云鄂博地区卷入 到活动大陆边缘了生,使得白云鄂博地区地层发生 了不同尺度的构造变形作用,表现为大型的紧闭褶 皱、一系列冲断层和韧性剪切带的出现(郝梓国等, 2002),形成了一系列韧性剪切带一同斜褶皱一叠 瓦状冲断层构造组合.由于本身密度、硬度的原因, 早期形成碳酸岩最容易发生褶皱变形、糜棱岩化作 用,粗粒的白云岩剪切形成了细粒白云岩.严格意 义上讲,白云鄂博成矿作用应该是产在古生代俯冲 增生杂岩带上,早期形成的碳酸岩以逆冲推覆体或 者构造岩片产出(章雨旭等,2011;王凯怡等, 2012).这为理解认识白云鄂博的成矿作用具有关 键意义.

3.4 宽沟中的白石山蓝片岩带

蓝闪片岩是判断研究区洋板块是否发生过洋 壳俯冲碰撞消减的关键识别标志,宽沟中的白石山 蓝片岩带分布在白云鄂博以北、宽沟中的白石山附 近.蓝闪片岩厚约3m.自北向南依次为:黑色石墨 片岩、浅色蚀变岩、碎屑质超糜棱岩、蓝闪片岩、碎 屑质超糜棱岩.岩石拉伸线理发育.蓝闪片岩呈浅 蓝灰色,纤维变晶结构,片状构造.蓝闪石为主要矿 物,约占50%以上,长柱状、纤维状,可见石棉.多色 性明显,由蓝绿色一浅绿色一浅黄色,干涉色强,为 暗蓝一紫一亮黄色,可见环带结构.黑云母、方解石 次之,各占20%左右,磁铁矿、石英少量.蓝闪片岩 中可见蓝闪石石棉.经X光粉晶鉴定蓝闪石类矿 物,主要有冻蓝闪石、镁钠闪石、钠长石;次为镁黑 云母、方解石,石英微量,偶见萤石.根据电子探针 资料,4个点均为同类矿物,化学成分雷同,镁钠闪 石,次为镁黑云母、方解石,石英微量.冻蓝闪石,次 为镁黑云母、石英、方解石微量与标准镁钠闪石成 分相同,以MgO、CaO含量高与钠闪石相区别.蓝 闪片岩中是否有标准蓝闪石尚待进一步研究.此 外,在矿区可见钠闪石脉,矿物呈黑色,干涉色强, 为暗蓝一亮蓝一浅黄绿,多色性不明显,与蓝闪石 类矿物相区别(图9)(张鹏远等,1993).

蓝闪片岩的地质意义在我国已引起人们的重视,目前,我国几条主要构造带几乎都找到了蓝闪 片岩,如北祁连、东秦岭、云南哀牢山、西藏雅鲁藏 布江、内蒙古等地都找到了蓝闪片岩.白云鄂博地 区蓝闪片岩的发现不是偶然的,与之伴生的还有蛇 纹质混杂岩、层状堆积辉长岩以及韧性剪切带,可 能构成一构造混杂岩带.白云鄂博地区蓝闪片岩至 少提醒我们,该区大地构造位置及属性需要深入



图9 横穿白云鄂博地区发育有韧性剪切带一同斜褶皱一叠瓦状冲断层相伴的逆冲构造堆叠垛简要构造剖面示意图

Fig.9 Schematic cross-section diagram of the thrust structural stack associated with the development of the ductile shear zone-isoclinic fold-shingled thrust across the Bayan Obo area

a.构造坡面;b.乌兰保力格断裂带内韧性剪切带构造实测剖面(阿贵南);c.白云鄂博群同斜褶皱一叠瓦状冲断层逆冲构造堆叠垛素描图(赛 乌苏金矿南);1.片理化火山凝灰岩;2.白云鄂博群火山岩;3.云母片岩;4.中基性脉岩;5.白云鄂博群砂岩与灰岩互层;6.海西期花岗岩;7.逆 冲断层;8.韧性变形带强变形域;据贾和义等(2003) 研究.

发育成熟的俯冲增生杂岩带常以韧性剪切 带一同斜褶皱一叠瓦状冲断层伴生在一起的逆冲 构造堆叠垛型式产出. 逆冲构造堆叠垛是洋板块地 质研究主要载体.在白云鄂博地区宽沟一白银角拉 克一乌兰宝力格断裂带内及其两侧都发育有以韧 性剪切带一同斜褶皱一叠瓦状冲断层伴生在一起 的逆冲构造堆叠垛(图11c),在这些逆冲构造堆叠 垛中,韧性剪切带主要发育在白云鄂博陆缘俯冲增 生杂岩的两侧,北部韧性剪切带发育在赛乌苏至阿 贵之间(GPS 坐标为 41°51′ 59″N, 110°01′ 28″E). 该 剪切带主体发育在白云鄂博呼吉尔图组火山岩中, 出露宽度大于350m,叶理产状为185°~205°/45°~ 70°,由若干强变形带及夹于其间的弱变形域构成 (图 9a,图 9b),线理与叶理方向存在一定交角(图 2d),但总体仍表现为近倾向线理的特点,倾伏产状 为130°~160°/45°~50°. 该剪切带控制了北部石炭 系与南部白云鄂博群的分布界限,应为区域上乌兰 保力格断裂带的重要组成部分. 南侧韧性剪切带沿 白银角拉克-宽沟断裂带呈零星分布,前人称之为 宽沟-熊包子剪切带.该剪切带在西矿-带出露宽 度约为300~400 m,剪切带叶理产状为340°_75°, 线理表现为斜向线理(倾伏向45°~60°,倾伏角35°~ 40°),反映该剪切带向南西方向斜向逆冲的特征. 上述剪切带作为白云鄂博陆缘俯冲增生杂岩带两 侧断裂的早期产物,应代表白云鄂博陆缘俯冲增生 杂岩带向南增生的早期拼贴构造残余形迹.在区域 上乌兰保力格断裂带与白银角拉克一宽沟断裂之 间,以发育同斜褶皱一叠瓦状冲断层逆冲构造堆叠 垛为代表(图11a和图11c),为一系列向南叠置的逆 冲断层,区域上这些断裂带相互叠置构成典型的叠 瓦状断裂构造堆叠垛(图9c),主要断裂均呈近东西 向分布,构造岩类型以构造片理化带、构造透镜体 带、断层泥、构造角砾岩等为代表.各断裂带出露宽 度不等,主要为一系列密集的束状断层构成的宽度 达100~500m的冲断层带.断层面主体倾向南,产 状大致为160°~190°~40°~60°,断层的性质.断裂 带内部的主要岩石组成为白云鄂博群上部层位的 H6~H15,这些地层在大规模的逆冲作用下形成同 斜倒转褶皱.沿白云鄂博矿区-阿贵路线剖面内进 行统计发现,这些褶皱构造明显受到断裂的控制, 从核部出露的两翼地层及轴面特征分析,其两翼产 状相同,应为一系列倒转褶皱,褶皱轴面均为南

倾,与区域内叠瓦状断裂共同构成典型的叠瓦状冲 断层一紧闭褶皱带.综合上述特征,白银角拉克一 宽沟断裂以北至乌兰保力格断裂带之间,以发育蛇 绿混杂岩.

韧性剪切带一叠瓦状冲断层一同斜褶皱为代 表,说明宽沟断裂以北的白云鄂博群是一套强烈构 造改造的岩石组合.这些岩石组合与板块俯冲过程 刮削下来而形成的构造加积杂岩的岩石组合特征 一致,综合上述野外观察和室内研究发现宽沟断裂 南北两侧白云鄂博群岩石的组成存在以下差异: (1)按变质程度,断裂南部变质程度较强,新生矿 物如黑云母阳起石绿帘石和角闪石等,变质程度可 达高绿片岩相,宽沟断裂以北则主要为未变质岩 石,新牛矿物仅见少量雏晶黑云母:(2)按构造热事 件改造特点,断裂南侧岩石可见大量构造一热事件 改造的岩石,如钠镁铁闪石化、钾长石化、萤石化和 大量黄铁矿、易解石、霓石等,白云鄂博主要矿床均 分布在断裂以南,而断裂北侧热事件的改造十分微 弱,仅在西部地段出现了少量的钠铁闪石矿物;(3) 宽沟断裂以北以韧性剪切带一叠瓦状断层一紧闭 同斜褶皱为特征,这与断裂南侧宽缓的向背斜构造 有明显差别:(4)沿区域白银角拉克一宽沟断裂带 产出特征型的比鲁特蛇绿混杂岩,它们是板块俯冲 形成的重要地质记录.另外资料显示沿白银角拉 克一宽沟断裂带同时产出具高压变质带特征的白 石山蓝闪片岩、呼和恩格尔堆积辉长岩等,这些特 征均反映汇聚型板块边界的特征性构造一岩石组 合,说明它们应为受板块俯冲过程中影响而加积于 华北板块北缘的构造加积杂岩带,而白银角拉克一 宽沟断裂应为具有古缝合带性质的断裂.

4 白云鄂博稀土矿的矿床成因

长期以来,地质界对白云鄂博赋矿白云岩的成 因有"水火之争",对成矿时代则有"元古代与古生 代之争"(刘铁庚,1985;袁忠信等,2004).针对这 些争议,地质界近年来开展了多学科综合野外地质 考察研究,内容涉及同位素地球化学和年代学、流 体包裹体、岩石学、沉积学、变质和交代作用、矿田 构造和大地构造等.根据这些综合研究成果,近年 来国内外地质学家提出了有关白云鄂博矿床多成 因多成矿模式(Fan et al.,2014;Wu et al.,2018; Zhou et al.,2018).但至目前为止,没有一种模型能 够成功地全面解释白云鄂博区内缤纷复杂的地质 与成矿现象,致使很多有关矿床成因关键性地质与 成矿问题争论依旧.研究该矿床成因的意义不仅是 解释矿床的形成条件,而且对于正确认识华北克拉 通北缘与西伯利亚克拉通俯冲碰撞条件下的陆下 岩石圈地幔的壳幔相互作用以及寻找超大型矿床 均有重要意义.

根据前人的研究积累,我们对与白云鄂博 REE-Fe-Nb矿床成因有关的关键性证据有针对性 地考察了若干典型露头和地质剖面.通过考察研讨 讨论,对下列关键现象和认识基本上达到了共识: (1)主、东铁矿体外围不仅产有数十条火成碳酸岩 岩墙(脉),而且分布有一定面积的稀土和铌矿化白 云岩;矿区外围南东25 km处的黑脑包地区存在有 未矿化的大面积块状灰岩,可与北京西山微晶丘灰 岩对比,指示碳酸岩成因多元化;(2)在矿区内的赋 矿白云岩与上覆板岩之间存在强烈的碱质蚀变(霓 长岩化),而在赋矿白云岩中存在碱质碳酸岩墙 (脉),在东矿以东,1号铌矿体北西的H4砂岩中可 来见到霓石一钠闪石一钠长石组合的脉,它切穿砂 岩层理,表明矿区内成矿过程中显然存在有来自深 部的REE-Nb矿化流体热液致矿成因:也指示矿区 成矿过程中存在深部岩石圈地幔熔融形成幔源流 体(郝梓国等,2002);(3)在比鲁特超基性岩体附近 存在俯冲增生杂岩,在东矿以东的露头上,可见多 处铁矿化砾块位于白云岩中,表明矿区成矿过程中 存在与洋板块俯冲作用有关构造混杂作用.此外在 一些地方,白云鄂博群下伏地层的变质程度不高, 仅有低绿片岩相,可见到变质砂岩与变质细砂岩成 分的层理,表明有关的白云鄂博群以逆冲构造岩片 覆盖在低绿片岩相砂岩与变质细砂岩之上;在达茂 旗附近的白云鄂博群灰岩中可见到震动液化脉,表 明白云鄂博群沉积时本区可能有地震活动;(4)主 矿和东矿均存在赤铁矿型矿石,且赤铁矿型矿石位 于磁铁矿型矿石的下盘;一些白云岩与上覆板岩间 为渐变过渡关系,在白云岩内部有多层板岩夹层, 在主矿北西约3km处,可见砂岩(H4)-板岩中薄 层白云岩互层以及与块状白云岩的过渡接触关系; 但是在与同一地点,可见碳酸岩墙侵入于砂岩(H4) 中,表明白云岩成因除来自深部岩石圈地幔熔融形 成幔源流体成因从外,还有洋盆沉积成矿多元成 因;(5)海西期花岗岩与白云岩为侵入接触关系,但 其接触界面有多处是很截然的,表明海西花岗岩晚 于白云岩;东矿以东的1~3号铌矿体均位于H4砂 岩与海西期花岗岩之间;在白云鄂博群之上最老的 地层为石炭系中酸性火山岩,表明白云岩成矿作用 要早于海西期,在石炭系中酸性火山岩喷发之前。

4.1 洋板块的大地构造背景是什么?

华北克拉通北缘构造背景单元划分,是地质界 一直关注的问题,近20年来源于对一些重大地质构 造问题存在截然不同的认识,先后提出了多种截然 不同划分方案,如有些研究人员认为,华北克拉通 北缘早古生代属于由该克拉通组成部分的内蒙地 轴区与其北侧早古生代晚期增生的岛弧造山带一 起构成的晚古生代陆缘活化造山带.我们根据上述 五点共识认为,从洋板块地质大地构造背景来看, 稀土成矿碳酸岩岩浆产在华北克拉通北缘的所谓 特殊的远端弧后构造环境(far backarc settings),有 人称为远离弧后背景或者变形的大陆边缘环境中 (deformed continental margins),也有人称为不在大 洋俯冲环境(岩浆弧环境)中(Cawood et al., 2009). 相对于大陆边缘弧来说,其位于向陆或向弧后位置 的大陆边缘环境,或产在大陆碰撞环境中.远端弧 后构造环境远离汇聚带或俯冲带向大陆或向弧后 位置的克拉通边缘上,即在华北克拉通北缘元古代 岩石圈与亚洲洋造山带岩石圈不连续界面上(discontinuity),受大规模深切岩石圈的断裂带系统或 岩石圈不连续构造系统控制.岩石圈不连续是岩石 圈块体之间的壳一幔结构、岩石组成、地热、陆壳和 岩石圈厚度等岩石圈成分和结构要素的不连续,为 巨型矿集区与矿床的形成提供源一运一储时空框 架,也是控制该区成矿作用的决定因素.

因为从软流圈(或对流地幔)中上涌分异出的 灼热幔源新生物质,和由它诱发的对陆壳物质加热 和再活化,在萃取壳幔中有用元素后将形成岩浆一 流体一成矿系统,其必然首先选择具有构造薄弱带 和不稳定性的先存岩石圈不连续界面向上运移成 矿,这些再活化的岩石圈不连续将为大型矿床或矿 集区形成提供有利储矿空间.

4.2 成矿碳酸岩携带的铁与 REE 源岩

成矿碳酸岩携带的铁与REE的源岩可能来自 携带着大量的铁与REE的亚洲洋洋壳沉积物.当 亚洲洋洋壳沉积物俯冲到华北克拉通岩石圈深部 或地幔之下会随俯冲板块一起发生熔融,形成携带 着大量铁与REE的熔流体,这些熔流体沿着陆下岩 石圈不连续系统或大规模深切岩石圈断裂带系统 会向上发生深循环运移而在岩石圈不同层位上形

成不同类型 REE-Fe-Nb 矿床. 据李廷栋等研究团 队的研究,海洋是一个巨大的资源库,不仅蕴藏着 丰富的石油、天然气和盐类资源,而且储藏着十分 丰富的金属矿产资源.美国科学家梅罗1965年估 算,世界大洋多金属结核资源总量达3×10¹²t,仅太 平洋就有1.7×10¹²t,其中具工业价值的储量约为 700×10^{8} t,折合金属量: 锰 175 × 10⁸t、镍 9.1 × 10⁸t、 $t_{1.5} \times 10^{8} t_{3}$ 铜 7 × 10⁸ t, 而且这种多金属结核每年 仍在以 600×10⁴~1 000×10⁴t 速度生长. 此外,还 有丰富的富钴锰结壳、海底硫化物矿床和多金属软 泥等.它们之中尚伴生有钛、钼、铅、锌、金、银、铂等 多种金属元素.从洋底金属矿产元素聚集、分布状 况和特点来看,现今大洋如是,古大洋亦然.现在的 问题是,随着古大洋板块的俯冲、消亡,这些金属元 素都到哪里去了?是不是一部分俯冲到地壳深部或 地幔,另一部分滞留在俯冲增生杂岩带,总之都汇 聚到俯冲增生杂岩带及其深部,构成金属矿床形成 的物质来源.所以近年来的研究发现,增生型造山 带储存着大量流体,蕴藏有众多大型、超大型铜、 金、多金属矿床.全球2/3的铜矿和1/3的金矿都与 俯冲型和碰撞型造山作用有关,大多分布于俯冲增 生型杂岩体内.亚洲大陆东缘滨太平洋成矿域和美 洲安第斯巨型斑岩型铜矿成矿带是俯冲增生造山 作用成矿的典型代表;我国中亚造山带是典型增生 造山作用成矿的实例.因此,通过洋板块地质和壳 幔相互作用的研究有助于查明这些矿床形成和分 布的时空规律和特点.

大洋岩石圈俯冲和弧岩浆作用引起弧下岩石 圈金属再富集, 己得到了研究证实.例如, Myhill (2011)研究了巴布亚新几内亚弧下地幔岩石样品, 发现交代成因的脉状橄榄岩包体(辉石岩一板片流 体交代产物)与周围的亏损地幔相比, Cu、Au、PEG 富集了 2~800倍, 证实大洋岩石圈俯冲、脱水和交 代导致俯冲变异的地幔橄榄岩发生金属再富集. Liu et al.(2017)研究了美国加利福尼亚中新世玄武 岩中的辉石岩包体(白垩纪弧岩浆在下地壳的堆晶 岩),发现辉石岩含有岩浆成因的金属硫化物, 其中 Cu高达400×10⁻⁶t, 远高于平均大陆壳的Cu.

成矿碳酸岩岩浆可能来自携带大量铁与REE 的亚洲洋洋壳沉积物于晚元古一早古生代向华北 克拉通俯冲消减到陆下岩石圈地幔SCLM深循环 过程中,在深切华北克拉通边缘的岩石圈不连续构 造系统中形成的岩浆碳酸岩及其携带的REE矿床. 矿区内Fe矿化与REE-Nb矿化可能不是同时期、同 成因的,即Fe矿化与小部分REE-Nb矿化可能与 中、新元古代的洋板块沉积与俯冲作用作用有关, 而REE-Nb矿化大部分则可能与早古生代的白云鄂 博洋板块沉积与俯冲作用形成的来自深部的地幔 流体热液致矿形成 REE-Fe-Nb 矿床作用有关,但 Fe矿石及其围岩也受到早古生代时期地幔热液的 强烈改造.为了纪念丁道衡(1933)、何作霖(1935) 首次发现白云鄂博REE-Fe-Nb矿床,我们把白云鄂 博与洋板块俯冲作用有关的来自深部的地幔流体 热液致矿形成的 REE-Nb 矿床称为道衡式 REE 矿 床,而把与洋板块运行过程中的沉积作用形成的稀 土和铌矿化白云岩称为作霖式 REE 矿床. 必须指 出,对上述两类型矿的共识并非我们的最新发现, 而是针对前人的争论经现场考察后对重要现象的 系统归纳和再认识,因此包含了众多国内同行的观 察和认识.

4.3 陆下岩石圈地幔深部地质作用过程与 REE-Nb 成矿

当代地质学家认识到,成矿作用实际上是大陆 生长过程的地质作用与产物.其中,岩石圈/软流层 系统的壳一幔相互作用对成矿作用具有重要的关 键控制作用,陆下岩石圈地幔熔融形成不同岩浆熔 体,它们向地壳输入热与地幔物质会进一步形成致 矿基性岩脉控制矿床一矿集区的形成(图10).因 此,从软流圈向地壳输入热与地幔物质引起的壳一 幔成矿作用过程的新视角,去研究洋板块俯冲作用 的岩浆一成矿作用的形成过程与大陆生长已成为 当代成矿地学新的重要研究前沿.这样,我们把软





它们进一步形成致矿基性岩脉控制矿床一矿集区的形成,据Richards(2003)

流圈上涌与洋板块俯冲作用控制的岩浆一成矿作 用的形成联系起来,从软流圈上涌新视角去研究白 云鄂博地区 REE-Fe-Nb矿床的岩浆成矿作用及其 形成的地质系统.

洋板块俯冲作用形成岛弧岩浆过程中会在陆 下岩石圈地幔中发生一系列的深部地质作用,其中 主要包括软流圈上湧与减压熔融作用,俯冲板片脱 水作用,俯冲板片之上的地幔楔的水化作用与岩浆 部分熔融作用,岩石圈地幔与地壳之间的岩浆底侵 作用,下地壳的MASH作用以及内侵定位于中、上 地壳的岩浆房分异结晶和挥发分出溶作用、岩浆一 热液流体作用等等(图11).所有这些深部地质作用 都受洋板块俯冲作用引发的软流圈上湧作用控制. 就白云鄂博地区REE-Fe-Nb成矿作用而言,正是因 为亚洲洋洋板块向华北克拉通之下的俯冲作用,引 发软流圈上湧作用诱发白云鄂博地区陆下岩石圈 地幔与岛弧地壳发生一系列的深部地质作用形成 了独特的REE-Fe-Nb矿床.

洋板块俯冲作用引发陆下岩石圈发生的深部 地质作用,主要包括软流圈上涌与减压熔融作用, 软流圈上涌与壳(岩石圈)幔之间的岩浆底侵作用, 俯冲板片脱水作用,俯冲板片之上的地幔楔的水化 作用与岩浆部分熔融作用,下地壳的MASH作用以 及内侵于中、上地壳形成岩基的岩浆房分异结晶和 和挥发分出溶作用、岩浆一热液流体作用等等.

在宽沟一白银角拉克一乌兰布拉格亚洲洋洋 板块向华北克拉通之下俯冲汇聚时,含大量稀土和 金属组分(Cu、Au、PEG)沉积物的亚洲洋洋板块板



图 11 洋板块俯冲作用引发陆下岩石圈地幔发生的一系列 深部地质作用(Richards, 2003)



片在向华北克拉通之下俯冲时,在华北克拉通岩石 圈地幔深部发生了引发稀土REE和金属组分矿床 形成的极为关键的一系列深部地质作用:首先源自 亚洲洋俯冲洋板块沉积物的含大量稀土和金属的 脱水流体,一方面使深部陆下岩石圈地幔发生大量 稀土和金属组分(Cu、Au、PEG)强烈交代作用,使 曾经亏损玄武岩的陆下岩石圈地幔发生交代富集 作用(Greenly, 1919),通过脱水流体交代地幔作用 方式向陆下岩石圈地幔引入了大量的亚洲洋沉积 物携带的稀土和金属组分.另一方面,源自亚洲洋 俯冲洋板块的脱水流体又使交代富集了大量稀土 和金属组分(Cu、Au、PEG)陆下岩石圈地幔和软流 圈,发生部分熔融和交代再富集作用,形成含大量 稀土和金属组分的富CO。岩浆流体和俯冲诱发形成 的岩浆(图12),这些流体和俯冲诱发形成的岩浆沿 着上覆板片中各种岩石圈不连续构造上侵底侵在 华北克拉通之下幔-壳边界上,这些流体和俯冲诱 发形成的岩浆在大陆下地壳底部幔一壳边界上停 留、储集和大规模堆积,形成新生岩浆池而发生底 侵作用,并形成幔一壳相互作用的新生底侵岩浆, 或以幔源岩浆为主的熔融体组成的新生下地壳,并 补充亲岩浆元素和成矿组分.

随着地壳底部镁铁质岩浆的不断结晶以及不断分异出富含挥发分和REE、Fe等金属元素的混合 岩浆的更成熟的化学成分,其释放的热量越来越 多,在不断上升聚集的含水岩浆及热量的作用下,



图12 俯冲于华北克拉通北缘之下携带的稀土和金属组分 洋板块熔融脱水作用如何在陆下岩石圈地幔和地壳 不同层位发生交代富集而形成大型稀土矿示意图

Fig.12 Sublimation of the rare earth and metallic component ocean plates carried under the northern margin of the North China Carton. How the dehydration of the oceanic plate in the substratum lithosphere mantle and crust is enriched to form a large rare earth deposit



- 图 13 新生岩浆底侵与壳幔混合作用使下部地壳的岩石发 生部分熔融和混合同化作用 MASH 过程,并形成以 花岗闪长质斑岩型岩石为容矿为主的地质成矿系统 Fig.13 Neogenetic magma bottom invasion and crust-man-
- tle mixing caused partial melting and mixing assimilation of the lower crust rocks to form a MASH process, and formed a geological mineralization system dominated by granodiorite porphyry rocks 据 Richards(2003)

下部地壳的岩石开始发生部分熔融和混合同化作 用的被称为MASH作用.这部分经MASH作用形 成的混合岩浆因为密度较小,将进一步阻止比重大 的镁铁质岩浆通过地壳,所以,该区域就成为幔源 和壳源物质的相互作用区.比重较大的高温镁铁质 岩浆在该处与壳源物质相互作用产生密度较小的 富含S、REE、Fe的安山质-英安质混合岩浆.在此 发生分异形成堆晶岩并与下地壳物质相互作用交 代,使下地壳部分熔融形成中性TTG岩类,难熔融 物质则下沉形成麻粒岩或榴辉岩.岩浆底侵作用与 壳幔混合作用(镁铁质岩浆池 MASH 作用过程)形 成安山质一英安质岩浆系统及其以花岗闪长质斑 岩岩石为容矿为主的富含S、REE、Fe的成矿的地 质系统(Richards, 2003)MASH作用与过程很复 杂,它是洋陆转换形成大陆以及弧岩浆成矿的第二 个关键地质成矿作用,该作用与过程不仅是形成安 山质一英安质岩浆系统的产物,也是形成岛弧地壳 中斑岩型矿关键地质作用.因为富含挥发分和金属 元素的混合岩浆密度较小,其密度与花岗闪长质及 花岗质岩石相似,所以其有足够的浮力上升穿过上 地壳,并喷发到地表,所以,从成矿潜力角度来看, 这些富含挥发分,S、REE、Fe以及其他不相容元素 混合岩浆因为岩浆氧化程度较高,所以其中的S大 部分以硫酸盐形式存在,这导致了亲铜元素比如 Cu, Au也以不相容元素形式继续赋存在岩浆中



- 图 14 岩浆底侵形成的混合岩浆发生内侵向上进入中、上 地壳,在上地壳汇集形成岩浆房,并发生分异与出溶 作用和成矿作用,形成上地壳岩浆房分异与出溶作 用和成矿作用的地质系统
- Fig.14 The mixed magma formed by the magma bottom invasion invades upward and enters the middle and upper crust, and gathers in the upper crust to form a magma room. Differentiation and dissolution and mineralization, forming a geological system of upper crust magma room differentiation and dissolution and mineralization

(图13).

因为富含挥发分和金属元素的新生底侵混合 岩浆密度较小,汇集在下、中地壳的TTG岩浆会向 上内侵在上地壳应力集中的区域形成岩浆房.因 此,部分底侵岩浆或新生的下地壳岩浆因受软流圈 上涌底侵动力影响又会向上上侵侵入华北克拉通 之下的下、中地壳,把软流圈和陆下岩石圈地幔大 量的高热作用带给了下、中地壳,引起下地壳基性 岩、中地壳中性岩发生部分熔融作用和岩浆混合作 用,形成新的以壳源岩浆为主岩浆熔融体形成岩浆 房,在这些岩浆房中由于减压和降温又会发生产生 一系列矿床的主要地质作用:一方面软流圈物质及 下地壳形成的壳幔混合岩浆带来的热对克拉通之 下中、上部地壳岩石发生熔融,形成具有上升并发 生侧向漫流的新生偏酸性岩浆,如以二长花岗岩为 主的酸性花岗岩类.一方面岩浆房内发生分异、分 离作用,同化混染作用形成酸性花岗岩类以及挥发 分的出溶作用与岩浆气泡化作用.所谓内侵(intraplating)是指形成于下地壳的幔源与壳幔源混合岩 浆和底侵基性岩浆受构造力作用会直接上侵进入 中、上地壳内部,并通过其热量使中、上地壳岩石重



图 15 陆下岩石圈地幔流体上侵在上地壳形成含矿碳酸岩岩浆房后,并发生岩浆分异与出溶形成成矿热液系统,成矿热液继续向上运移时受不同性质构造控制而形成多样性不同矿床类型示意图

Fig.15 After the subcontinent lithosphere mantle fluid invaded the upper crust to form a ore-containing carbonate rock magma chamber, magmatic differentiation and dissolution occurred to form a ore-forming hydrothermal system. Ore-forming hydrothermal fluids continue to move upward and are controlled by different properties to form diverse deposit types

熔,形成具有上升并发生侧向漫流的新生岩浆的所 有岩浆地质作用要素和过程.幔源与壳幔源混合岩 浆向上内侵定位过程中能诱发地壳不同层次的围 岩发生部分熔融,并且新生岩浆具有一定的上升定 位能力(图14).这一性质使内侵有别于一般意义上 的岩浆侵入.所以除了底侵作用以外,幔源与壳幔 源混合岩浆的内侵作用也可以造成中、上地壳不同 层次岩石的部分熔融,这是花岗质岩浆生成的重要 机制和地壳垂向增生的重要方式,是形成岩浆岩多 样性的原因.

软流圈上涌及其诱发的壳幔混合岩浆带来的 热能高时对大陆中、上部地壳岩石的熔融一般可产 生下面的产物:

(1)TTG 岩类源岩的熔融产生二长花岗岩和花 岗岩岩浆.

(2)大陆加厚地壳底部的熔融作用可形成高压 粗面(正长岩)岩浆(指无负 Eu 异常, Sr/Y 比值高的 粗面岩和粗面安山岩类).

(3) 泥质岩石或硬砂质岩石作为源岩熔融作用 可形成过铝花岗岩类.

(4)钙碱性和高钾钙碱性的安山质源岩可形成 高钾钙碱性花岗岩岩浆.低钾的拉斑玄武岩源岩熔 出的英安岩一流纹岩岩浆是低钾的;中钾的碱性的 和钙碱性玄武岩源岩熔出的英安岩一流纹岩岩浆 亦是中钾钙碱性系列.高钾钙碱性系列的岩浆需要 高钾钙碱性系列的安山质源岩,或位于高钾和中钾 钙碱性系列交界处的英云闪长岩源岩.

这些新的壳源岩浆熔融体的高热作用又引起 其上覆上地壳不同层圈、特别是不同地壳层的熔 融,形成大量的不同类型花岗质岩.在这个过程中, 含大量稀土的陆下岩石圈地幔的熔融岩浆以及软 流圈上涌放出了大量含稀土和金属组分(Cu、Au、 PEG)的成矿流体.

上侵在上地壳层次的岩浆熔融体会形成含矿 碳酸岩岩浆房,并在岩浆房形成过程中也放出大量 不同类型含大量稀土的多元成矿流体,这些成矿流 体形成含矿碳酸岩岩浆房后,因受造山后伸展构造 减压作用继续向上运移到不同性质构造中,形成受 不同性质构造控制的不同含矿碳酸岩矿床类型(图 15).它们在上地壳共同构成含大量稀土和金属组 分多元成矿元素的岩浆-流体-成矿系统,造成大 规模稀土和金属组分多元成矿.

要特别说明的是,含大量稀土和金属组分的岩 浆-流体-成矿系统沿华北克拉通之下不同岩石 圈不连续界面及不同尺度断裂系统连续向上运移 时,不仅对周围地壳进行加热,同时还会萃取流体 通道系统周边岩石中的有用成矿元素,形成以亲地 幔和亲陆壳的成矿元素共生在一起的复杂的稀土 和金属组分多元成矿作用,形成多个多元成矿子系 统.软流圈上涌底侵的巨大能量还会引发上地壳岩 浆一流体一成矿系统流体进一步向外流动,产生一 系列主矿床外围的多元成矿元素低温对流循环系 统和低温成矿事件.

岩浆向上内侵在上地壳应力集中的区域形成 岩浆房后,由于温度与压力进一步降低,岩浆房发 生分异、分离作用、同化混染作用以及挥发分的出 溶作用与岩浆气泡化作用会在岩浆房内逐渐形成 一个岩浆-热液成矿系统,其与成矿物质来源于下 部MASH区域的向上运移的岩墙通道的岩浆一热 液成矿系统混合形成新的富集了一定数量稀土和 金属组分(Cu、Au、PEG)岩浆-热液成矿系统.这 些富集了一定数量稀土和金属组分和S的热液流体 会从岩浆房中出溶,与此同时,矿石矿物也会在流 体相分离,冷却,与围岩以及外部流体相互作用下 富集并沉积下来.这些上地壳岩浆房热液成矿系统 最终交代各类碳酸岩(盐),控制了白云鄂博地区成 矿岩浆所形成的 REE-Fe-Nb 矿床的规模.因此,富 含稀土和金属元素这些地质作用之间的组合以及 各自的影响尺度却决定了是否满足稀土和金属矿 床形成条件. 矿床规模基本是受岩浆房中的岩浆数 量与出溶作用规模控制的.其他因素如岩浆一热液 迁移演化,围岩性质以及后期的侵蚀风化等均直接 影响矿床的品味和价值,但不在本文的研究范围 之内.

岩浆房发生分异、分离作用过程中又会形成新的分异岩浆,其向上上侵形成浅部的岩浆室,该岩浆室在深部岩浆房的补给下进一步分异与向上侵位形成次火山岩侵入体及所谓的深成岩补充体.如果岩浆房与岩浆通道的规模足够大,深部岩浆(温度高,富含挥发分)的补给造成了残余岩浆的喷发和排气作用,该岩浆室经过进一步的分异演化,富含挥发分的英安质岩浆会向上内侵侵位,挥发分会沿着次火山构造通道向上运移,并且产生了岩浆一热液钾化蚀变,可能还有Cu的矿化.

各岩浆中挥发分的出溶是浅部含水岩浆房或 岩浆室在结晶冷却过程中必然发生的,同时也是岩 浆一热液型Cu矿与稀土形成的必要阶段.但是并 不是热液矿床形成的必要条件.某些斑岩型与热液 型系统上部的深成岩中发现的泥质蚀变作用证明 了浅部排气作用的存在,而且这种气孔很可能是深 部岩浆一热液活动以及隐伏斑岩型矿床的地表找 矿标志.

岩浆气泡化作用能使岩浆的密度快速降低到

上地壳疏松地层之下,从而使岩浆大量上升喷发. 而且岩浆喷发期间的挥发分出溶作用可以使岩浆 的数量达到99%,导致岩浆剧烈喷发,形成火山一 侵入系统.

5 白云鄂博地区洋板块地质构造演化

白云鄂博地区作为华北克拉通北缘的一部分, 受亚洲洋洋板块地质构造演化改造与制约.前人针 对华北克拉通北缘白云鄂博地区区域构造及亚洲 洋洋板块地质演化过程进行了大量的地质研究(牛 树银和胡骁, 1993;地矿部内蒙古地质矿产勘查开 发局,1997),但依然存在很多尚未解决的问题.就 现有资料而言,华北克拉通北缘白云鄂博地区洋板 块地质构造演化可以归纳为4个阶段:中元古代华 北克拉通北缘发生裂离与初始亚洲洋的形成、新元 古代亚洲洋的扩张与被动陆缘的形成、早古生代活 动陆缘与初始板块俯冲增生杂岩的形成、晚古生代 (二叠纪-三叠纪)洋盆逐渐封闭对接阶段.本文是 在前人构造演化轮阔的基础上,根据近年来所取得 的具体资料,对白云鄂博地区洋板块地质构造演化 进行初步总结,试图通过抛砖引玉",引起国内学术 界对这一地区研究工作的加强和深入.

5.1 中元古代克拉通北缘发生裂离与初始亚洲洋的形成

中元古代受全球哥伦比亚 Columbia 超大陆裂 解影响,华北克拉通北缘的基底在1917 Ma前后发 生裂解,形成了以車根达来等地为代表的裂谷,并 逐渐扩张为初始裂谷型亚洲小海盆,裂谷型初始亚 洲洋盆发育了一套白云鄂博群都拉哈拉组一哈拉 霍格特组为代表的洋板块地层序列,伴随着裂谷型 海盆持续的拉张沉陷,海盆进一步扩张并形成亚洲 洋初型.总之,中元古代克拉通北缘海盆主要以典 型的碱性、双峰式的碱性玄武岩和碱性流纹岩喷发 火山岩系为主,夹有车根达来基性-超基性岩组合 洋壳残块,炭质泥岩、陆源碎屑岩等洋板块地层岩 石组合.在滨海地区,广泛发育裂谷型滨海相一浅 海相碎屑岩-碳酸盐岩沉积.白云鄂博群中发育的 变质玄武岩、变质的基性侵入岩,其大地构造环境 判别图解中,主要落在板内玄武岩区,为典型的裂 谷玄武岩.总体上反映了一个裂谷海盆一小洋盆, 裂谷海一小洋盆地由浅变深、沉积范围逐渐扩大的 过程,为华北克拉通北缘陆内裂谷的海盆一小洋盆 典型沉积建造(图16).



深部岩浆上涌

图16 中元古代华北克拉通北缘发生裂离与初始亚洲洋的形成

Fig.16 The rifting in the northern margin of the North China Carton and the formation of the initial Asian Ocean during the Middle Proterozoic



图 17 晚元古代亚洲洋的扩张与被动陆缘的形成

Fig.17 The Expansion of the Asian Ocean and the Formation of Passive Continental Margins during the Late Proterozoic

5.2 晚元古代亚洲洋的扩张与被动陆缘的形成

伴随着陆间裂谷盆地持续的拉张沉陷,海盆进 一步扩张并形成亚洲洋被动陆缘初型(图17),华北 克拉通北缘的大陆裂谷型海盆逐渐转化为被动陆 缘与亚洲洋洋盆地,发育了以白云鄂博群为代表的 稳定类型碎屑一碳酸盐岩沉积层序建造,其基本层 序是下部为碎屑岩系,上部为碳酸盐岩,反映陆源 碎屑逐渐减少,华北克拉通逐渐被侵蚀、夷平的过 程.另外,盆地边界断裂的强烈活动,陆内裂谷性盆 地逐渐演化为大陆边缘大洋盆地.随着华北克拉通 侵蚀、夷平的过程,盆地形成了以暗色页岩和浊积 岩为代表的半深水一深水相沉积,形成层位稳定的 滑混堆积岩(比鲁特组).并在盆地北部地区形成初 始洋壳超基性岩浆活动,该岩石组合代表了白云鄂 博地区已由大陆内部裂谷向大陆边缘洋盆地转化 的被动陆缘深海—半深海相沉积.

5.3 早古生代活动陆缘与初始洋板块俯冲增生杂 岩的形成

5.3.1 活动陆缘与洋板块俯冲造山的启动 早古生 代华北克拉通北缘以发育海进序列滨海相砂、页 岩、碳酸盐岩组合为主,并伴有活动大陆边缘火山 岩特点的白音宝拉格组,胡吉尔图组和阿牙登组沉 积组合的大量火山熔岩、火山碎屑岩和成熟度低的 陆源碎屑岩系.华北克拉通北缘大量的安山岩、英 安岩等钙碱性火山活动,反映早古生代华北克拉通 北缘已由扩张转变为逐步收缩的过程,说明华北克 拉通北缘在早古生代已由稳定被动陆缘向活动大 陆边缘转化背景下的沉积一火山岩岩石组合.其 中,中、酸性火山岩系地球化特征指示,其形成的构 造环境为造山带,主体为岩浆弧.因此,这些火山岩 系应记录了华北克拉通北缘大地构造属性由被动 陆缘洋盆转化为俯冲造山带的时、空特征.

5.3.2 初始洋板块俯冲增生杂岩的形成 在早古生 代亚洲洋发育期间,华北克拉通与西伯利亚克拉通 发生相向汇聚性运动.在这汇聚背景下,华北克拉 通北缘的白云鄂博陆缘洋盆内的洋陆过渡带附近 的洋壳却发生折断事件,形成了大致相当于白银角 拉克一宽沟一乌兰布拉格岩石圈不连续(断裂带), 亚洲洋洋板块沿洋壳折断部位发生发生向北初始 俯冲,在白银角拉克一宽沟一乌兰布拉格岩石圈不 连续界面(断裂带)附近,亚洲洋洋壳向北华北克拉 通北缘之下发生初始俯冲,形成白银角拉克一宽 沟一乌兰布拉格板块俯冲汇聚带边界,位于俯冲带 下盘(白银角拉克-宽沟-乌兰布拉格断裂以北) 的洋壳及过渡壳基底上的白云鄂博群,其一部分洋 壳(包括沉积碳酸盐岩岩石)含大量稀土和金属组 分(Cu、Au、PEG)随着俯冲板片一起被带入到华北 克拉通板块的岩石圈地幔之下,这时源自亚洲洋俯 冲板片的脱水流体一方面使陆下岩石圈地幔发生 稀土和金属组分(Cu、Au、PEG)强烈交代作用,使 曾经亏损的陆下岩石圈地幔富集了大量稀土和金 属组分另一方面,富集了大量稀土和金属组分俯冲 板片岩石(包括沉积碳酸盐岩)在足够高的温压条 件下发生部分熔融,部分熔融熔体在华北克拉通板 块之下上升与其上面的地幔楔岩浆发生混合交代 形成碳酸岩浆,该碳酸岩浆以及地幔楔幔源流体沿 白银角拉克一宽沟一乌兰布拉格俯冲带上侵到上 盘的白云鄂博群碳酸盐岩中,并进一步交代俯冲带 上盘的熔融白云鄂博群碳酸盐岩,形成白云鄂博群 碳酸岩矿床,并造成了俯冲带上盘岩石发生高温低 压变质.组成俯冲板块未被俯冲下去的部分岩石, 即俯冲带下盘白云鄂博群的主体岩石则在板块俯 冲过程中未被俯冲下去而被刮削下来,拼贴在上盘 的仰冲板块一侧,形成以俯冲增生杂岩为特色的构 造样式即蛇绿混杂岩一叠瓦状冲断层一紧闭褶皱 组合为代表的构造样式白银角拉克一宽沟一乌兰 布拉格俯冲增生杂岩带,局部则形成了以低温高压



图 18 初始板块俯冲增生杂岩形成的洋板块构造格局示意图

Fig.18 Schematic diagram of tectonic pattern of oceanic plates formed by initial plate subduction and accretionary complexes



图19 晚古生代(二叠一三叠纪)亚洲洋洋盆逐渐封闭拼贴阶段
Fig.19 Late Paleozoic (Permian-Triassic) Asian Ocean basin gradually closed and collage stage

变质作用为代表的蓝片岩组合(图18).

5.3.3 晚古生代(二叠-三叠纪)亚洲洋洋盆逐渐封闭 拼贴阶段 伴随亚洲洋洋板块俯冲作用的持续进 行,被刮削下来的俯冲增生杂岩逐渐持续拼贴在华 北克拉通北缘的大陆上,导致板块俯冲带逐渐持续 向背离大陆方向迁移,依次分别形成早古生代、晚 古生代(二叠-三叠纪)俯冲增生杂岩带及其相应 的造山带,并伴随相应的早古生代、晚古生代俯冲 岩浆活动,西伯利亚克拉通南缘也大致经历了相同 的俯冲增生过程.南、北两个克拉通大陆经过早古 生代、晚古生代逐渐俯冲增生拼贴之后,大致于晚 二叠世-三叠纪在研究区北部的索伦山-西拉木 伦地区最终对接拼贴缝合在一起,亚洲洋最后消 失,形成著名的索伦山-西拉木伦对接缝合带,奠 定了本区基本的构造格局(图19).

6 结论

全球规模最大的白云鄂博超大型稀土矿产于 华北克拉通北缘,受亚洲洋向华北克拉通北缘俯冲 的洋板块地质演化控制,华北克拉通北缘遭受险近 亚洲洋洋板块俯冲碰撞造山作用影响而发生克拉 通边缘裂解作用,导致克拉通边缘内部形成所谓特 殊的远端弧后构造环境(far backarc settings)特殊成 岩、成矿作用.来自携带大量铁与REE的亚洲洋洋 壳沉积物于新元古-早古生代向华北克拉通之下 俯冲消减,开始了携带大量铁与REE的亚洲洋洋壳 沉积物在华北克拉通陆下岩石圈地幔 SCLM 中的 复杂的深循环作用历程.亚洲洋俯冲板片的脱水流 体使华北克拉通北缘的陆下岩石圈地幔与软流圈 发生大规模稀土和金属组分(Cu、Au、PEG)强烈交 代作用,并使曾经亏损的陆下岩石圈地幔与软流圈 富集了大量的稀土和金属组分,这是在华北克拉通 北缘深部形成稀土 REE 和金属组分矿床极为关键 的一步.而这一步也是当前白云鄂博超大型稀土矿 产研究中最弱的一环.亚洲洋洋板块向华北克拉通 北缘俯冲过程中相继发育了中、晚元古代,旱、晚古 生代俯冲增生杂岩带,正是这些洋板块多次俯冲作 用造就了白云鄂博稀土矿产的形成.

致谢:本文撰写得到了藩桂棠、陆松年、邓晋 福、冯益民、张克信、李以科、柯昌辉等专家的指导, 在此深表衷心感谢,今年是李廷栋院士诞辰90周 年.我们三代人以此作祝贺我们的导师李廷栋院士 90华诞.李先生是建国后中国地质科学事业的主要 开拓者之一,也是领导者之一.在李先生担任中国 地质科学院院长与地质部总工与科技司司长期间, 地质与矿产事业受到国家高度重视,是地质事业服 务于中央政府最为辉煌的时期.地质工作者在地质 普查、矿产、石油、海洋、地震、铀矿(国防)等诸方面 都有重大进展,为国家的经济和国防做出了实质性 贡献.李廷栋院士领导与研究的"地质编图与区域 地质研究","岩石圈与青藏地质研究"把板块构造 理论与深部地质引入扩展到地质学的研究中,用板 块构造理论与深部地质观点来研究中国地壳构造 及其变形规律.并开创了与西方,特别是与法国、 美国国际合作研究以及南极地质研究.近年来李先 生强调全球洋陆转化的运动,提出要重视洋板块地 质研究并把它作为板块构造理论上大陆的切入点 等,至今仍有前瞻性和指导意义.我们年轻时耳边 时常听到的大科学家的名字就是李四光、钱学森 等.当我们有幸也走上地质道路并与李先生共事之 后,看到了也親自参与了李廷栋先生更多的传奇故 事与实踐.今年是李廷栋院士诞辰90周年,我受到 《地球科学》主编约稿时,即决定写一篇文章,表达 我们对李院士的崇敬之情.这篇文章是对华北克拉 通白云鄂博超大型稀土矿产研究中最弱的构造演 化研究的一个提纲式小结,挂一漏十难免,言不达 意甚多.洋板块地质与大陆形成和演化是地质学中 的主题学科之一,任重道远,许多问题还会在今后 进一步深化、修正和完善.在此我们要感谢我的研

究团队、研究所内外的同行们以及国内外合作者, 也要感谢学生们,特别要感谢内蒙地调院许多研究 员在成文与定稿过程中的大力帮助.

References

- Cawood, P., Kroner, A., et al., 2009. Earth Accretionary Orogens in Space and Time. Geological Society of London Special Publication 318, London, 1-36.
- Ding, D.H., 1933. Bayan Obo Fe Ore Deposits in Suiyuan. Geological Report, Geological Survey of China, 23(in Chinese with English abstract).
- Fan, H. R., Hu, F. F., Yang, K. F., et al., 2014. Integrated U-Pb and Sm-Nd Geochronology for a REE-Rich Carbonatite Dyke at the Giant Bayan Obo REE Deposit, Northern China. Ore Geology Reviews, 63: 510-519. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.03.005
- Greenly, E. 1919. The Geology of Anglesey. Memoir Geological Survey of Great Britain, Vol. 2. HMSO, London, 1-980.
- Hao, Z.G., Wang, X.B., Li, Z., et al., 2002. Petrological Study of Alkaline Basic Dyke and Carbonatite Dyke in Bayan Obo, Inner Mongolia. Acta Petrologica et Mineralogica, 21(4): 429-444(in Chinese with English abstract).
- He, Z.L., 1935. A Preliminary Study of Rare Earth Minerals from Bayan Obo Ore Deposits in Suiyuan. Bulletin of the Geological Society of China, 14(2):279-282(in Chinese with English abstract).
- Jia, H.Y., Baoyin, W.L.J., Zhang, Y.Q., 2003. Characteristics and Tectonic Significance of the Wude Suture Zone in Northern Damaoqi, Inner Mongolia. *Journal of Chengdu University of Technology*, 30(1): 30-34(in Chinese with English abstract).
- Li, C.Y., Wang, Q., 1983. Paleoplate Tectonics in North China and Surrounding Regions, and Implication for Formation of Eurasian Continent. Contributions to Plate Tectonics in North China (No.1). Geological Publishing House, Beijing(in Chinese with English abstract).
- Li, J.L., Hu, F.Y., 1981. The Serpentinitic Olistostrome in Bayanobo Group. *Scientia Geologica Sinica*, (3): 269– 272+301(in Chinese with English abstract).
- Liu, T.G., 1985. Geologico-Geochemical Characters of Bayan Obo Rauhaugite. Act Petrologica Sinica, 1(3):15– 28 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. H., Zhao, G. C., Liu, F. L., et al., 2017. Detrital Zircon U-Pb and Hf Isotopic and Whole-Rock Geochemical Study of the Bayan Obo Group, Northern Margin of

the North China Craton: Implications for Rodinia Reconstruction. *Precambrian Research*, 303: 372-391. https:// doi.org/10.1016/j.precamres.2017.04.033

- Myhill, R., 2011. Constraints on the Evolution of the Mesohellenic Ophiolite from Subophiolitic Metamorphic rocks. The Geological Society of America, Special Paper, New York, 480:75-94.
- Niu, S.Y., Hu, X., 1993. Evolution of the Paleoplate Tectonics on North Side of North China Platform. *Geological Science and Technology Information*, 12(1): 17-21 (in Chinese with English abstract).
- Richards, J. P., 2003. Tectono-Magmatic Precursors for Porphyry Cu-(Mo-Au) Deposit Formation. *Economic Geolo*gy, 98(8): 1515—1533. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.98.8.1515
- Shang, H.S., Tao, J.X., Baoyin, W.L.J., et al., 2003. The Arc Basin System and Tectonic Significance of Early Paleozoic in Baiyun' ebo Area Inner Mongolia. *Geological Survey and Research*, 26(3): 160-168(in Chinese with English abstract).
- Wang, H.Z., Liu, B.P., Li, S.T., 1990. Geotectonic Division and Evolution Stages of China and Its Adjacent Regions. Tectonic and Biological Paleogeograpaph of China and Its Adjacent Regions. China University of Geosciences Press, Wuhan(in Chinese with English abstract).
- Wang, K.Y., Yang, K.F., Fan, H.R., et al., 2012. Addressing Some Problems on Research of the Bayan Obo Deposit. Acta Geologica Sinica, 86(5): 687-699(in Chinese with English abstract).
- Wu, C., Zhou, Z., Zuza, A. V., et al., 2018. A 1.9 Ga Mélange along the Northern Margin of the North China Craton: Implications for the Assembly of Columbia Supercontinent. *Tectonics*, 37:3610-3646.
- Yuan, Z.X., Bai, G., Zhang, Z.Q., 2004. Autometasomatic Phenomena of Host Rocks in the Bayan Obo Ore Depos-It and Their Significance. Acta Petrologica et Mineralogica, 23(1): 19-25(in Chinese with English abstract).
- Zhang, P.Y., Li, S.Q., Wang, C.Y., et al., 1993. The Geologico-Tectonical Characteristics in Bayan Obo Region. Bulletin of the Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, 28:1-86 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.X., Lv, H.B., Wang, J., et al., 2011. Analysis of Ore Forming Tectonic Settings of the Bayan Obo REE Deposit. Acta Geologica Sinica, 86(5): 767-774(in Chinese with English abstract).
- Zhou, J. B., Zheng, Y. F., Yang, X. Y., 2002. Paleoplate Tectonics and Regional Geology at Bayan Obo in Northern Inner Mongolia. Geological Journal of China Univer-

sities, 8(1):46-61 (in Chinese with English abstract).

Zhou, Z., Hu, M., Wu, C., et al., 2018. Coupled U-Pb dating and Hf Isotopic Analysis of Detrital Zircons from Bayan Obo Group in Inner Mongolia: Constraints on the Evolution of the Bayan Obo Rift Belt. *Geological Journal*, 53:2649-2664.

附中文参考文献

- 地矿部内蒙古地质矿产勘查开发局,1997.区域地质调查图 幅说明书(1:5万)达茂旗地区乌兰布拉格幅(K49E0130 08).呼和浩特:内蒙古自治区地质调查院.
- 丁道衡,1933.绥远白云鄂博铁矿报告.中央地质调查所地质汇 报,23.
- 郝梓国,王希斌,李震,等,2002.白云鄂博矿区碱性基性 岩一碳酸岩岩墙岩石学研究.岩石矿物学杂志,21(4): 429-444.
- 何作霖,1935. 绥远白云鄂博稀土类矿物初步研究.中国地质 学会会志,14(2):279-282.
- 贾和义,宝音乌力吉,张玉清,2003.内蒙古达茂旗乌德缝合带特征及大地构造意义.成都理工大学学报(自然科学版),30(1):30-34.
- 李春昱,王荃,1983.我国北部边陲及邻区的古板块构造与欧 亚大陆的形成,见:唐克东,著,中国北方板块构造文集 (第一集).北京:地质出版社.

- 李继亮,胡辅佑,1981.白云鄂博群中的蛇纹岩质滑塌堆积. 地质科学,(3):269-272+301.
- 刘铁庚,1985.白云鄂博白云碳酸岩的地质和地球化学特征. 岩石学报,1(3):15-28.
- 牛树银, 胡骁, 1993. 华北地台北侧的古板块构造演化. 地 质科技情报, 12(1): 17-21.
- 尚恒胜,陶继雄,宝音乌力吉,等,2003.内蒙古白云鄂博地 区早古生代弧-盆体系及其构造意义,地质调查与研 究,26(3):160-168.
- 王鸿祯,刘本培,李思田,1990.中国及邻区大地构造划分和 构造发展阶段.见:王鸿祯,等,著,中国及邻区构造古 地理和生物古地理.武汉:中国地质大学出版社.
- 王凯怡,杨奎峰,范宏瑞,等,2012.白云鄂博矿床研究若干 问题的探讨.地质学报,86(5):687-699.
- 袁忠信,白鸽,张宗清,2004.白云鄂博矿床赋矿岩石的自 交代现象及其意义.岩石矿物学杂志,23(1):19-25.
- 张鹏远,李双庆,王长尧,1993.白云鄂博地区地质构造特征. 中国地质科学院天津地质矿产研究所所刊,(28): 1-86.
- 章雨旭,吕洪波,王俊,等,2011.白云鄂博矿床成矿构造环 境分析.地质学报,86(5):767-774.
- 周建波,郑永飞,杨晓勇,2002.白云鄂博地区构造格局与古 板块构造演化.高校地质学报,8(1):46-61.