



兴蒙造山带及华北板块北缘钼矿化

——进展、规律、问题与成因初探*

刘翼飞, 江思宏

(中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037)

摘要 兴蒙造山带及其南侧受古亚洲洋南向俯冲所影响的华北板块北缘内各有1条显著的中生代斑岩钼成矿带,并在东西两侧首尾相连。文章综述了伸展环境下的斑岩钼矿床的研究进展,对兴蒙造山带及华北板块北缘内这2条钼成矿带的成矿背景、分布规律、矿床共生组合特点、成矿岩浆的属性、巨量金属和水的来源以及斑岩铜、钼矿化的异同等进行了总结,并从成矿岩浆源区塑造过程的角度初步探讨了巨型钼成矿带的形成特点。这2条钼成矿带在地质特征和区域矿床组合上非常相似,具有相似的启动时间和峰值时间,与区域内的斑岩铜矿化在时代上具有不共生的特点,矿化特征也与美国科罗拉多地区产出的高F型斑岩钼矿化类似,二者构成了统一的整体。元素地球化学对比研究显示,南、北2条钼成矿带的成矿岩浆与古生代斑岩铜成矿岩浆以及中生代的碱性岩浆均具有相似的特征,为脱水熔融的产物,并与古老陆下岩石圈地幔包体、新生代软流圈地幔玄武岩具有显著的差别。研究认为,南钼矿带的岩浆源区是亏损金属和水的古老岩浆源区,古生代洋片俯冲过程脱水交代改造后的产物,北钼矿带的岩浆源区是古生代洋片俯冲增生形成的富水源区。成(含)矿岩石Sr同位素研究显示,南、北2条钼成矿带成矿源区均启动于Rb/Sr比值较低的源区,受到上部高Rb/Sr比值地壳的混染;Nd同位素特征的对比研究显示,二者初始Nd值差别极大,但是Sm/Nd比值非常相似,显示放射性成因Nd的积累在三叠纪以后是一致的,也说明初始Nd值的差别是成矿源区塑造前所形成和继承的,同时也说明初始Nd值的差异可能掩盖了Mo成矿岩浆形成的真正原因。通过与世界范围内其他典型钼成矿带的对比研究,认为南、北2条钼成矿带成矿的岩浆源区位于陆下岩石圈地幔,古生代期间古亚洲洋向南、北两侧的俯冲在其形成过程中具有重要作用,主要体现在塑造富集型源区、水化造山带和增厚岩石圈等几个方面。俯冲改造、加厚并富集了水和大离子亲石元素的陆下岩石圈获得了地球化学上的不稳定性,在伸展构造环境(可能有多期伸展)驱动下,脱水熔融以达到稳定的趋势,在这个过程中,其化学成分将逐渐与古老陆下岩石圈地幔的化学成分趋于一致。因此,水化的陆下岩石圈地幔在伸展过程中的低程度批式脱水部分熔融,形成的富含金属和水的高分异型岩浆构成了成矿岩浆,并在岩石圈的不同尺度经过多阶段结晶分异-同化混染后,就位成为近矿岩浆房。陆下岩石圈脱水熔融的结束也意味着巨型热液钼矿化作用的结束,并决定了俯冲后巨型热液成矿带总的生命周期,这也与兴蒙造山带及华北板块北缘钼矿化(甚至其他热液型矿化)在早白垩世(约130 Ma)趋于减弱并熄灭的现象一致,也使得新生代的碱性岩浆岩不具有显著的脱水熔融特征。综上,笔者认为兴蒙造山带及华北板块北缘的斑岩钼矿化为一个统一的整体,属于古亚洲洋俯冲作用水化的源区在后期强烈伸展环境下部分熔融的产物,是古亚洲洋俯冲成矿作用的延续和发展,也是古生代塑造的富集型源区在中生代伸展构造驱动下的复合成矿作用。

关键词 地质学;斑岩钼矿床;高F型;富集型岩浆源区;造山带水化;金属的富集与再富集;俯冲后成矿;兴蒙造山带;华北板块北缘

中图分类号: P618.65

文献标志码: A

Mo mineralization in Xing'an-Mongolian orogen and north margin of China craton: Review, question and a preliminary genetic model

LIU YiFei and JIANG SiHong

(MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China)

* 本文得到国家“973”项目(编号:2013CB429805)、国家自然科学基金项目(编号:41302057、41273061)、中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(编号:K1311)和地质调查局地质大调查项目(编号:121201004000150009)联合资助

第一作者简介:刘翼飞,男,1981年生,博士,主要从事矿床地质和矿床地球化学研究。Email: lyfsky@126.com

收稿日期: 2016-07-17; 改回日期: 2016-10-22。张绮玲编辑。

Abstract

The Xing'an-Mongolian orogen (XMO) is the eastern part of the Central Asian Orogenic Belt (CAOB). There are two Mesozoic Mo mineralization belts in the XMO and its adjacent areas, i. e., the northern and southern Mo mineralization belts. In this paper, the tectonic setting, distribution of Mo mineralization, deposits assemblage character, geochemical feature of ore-formation magma, source of metals and water for Mo deposits, and similarity between Mo and Cu mineralization in XMO and its adjacent areas are reviewed. Based on the authors' and previous studies, this paper puts forward a genetic model for the two Mo mineralization belts with a focus on the source region of magma associated with the Mo mineralization. The two belts share similar geological features to high F type Mo deposits in Colorado mineralization belt, and the two belts also share similarity in their deposits assemblages, geochemistry of ore-forming magma, initiation and peak mineralization age. Thus, the authors propose that the two Mo mineralization belts share the same key genetic process, and constitute an integrated mineralization belt on the whole. Based on the comparative study of geochemical geology of the ore-forming magma for the two Mo mineralization belts, it's proposed that the formation of the ore-formation magma is similar to the Paleozoic porphyry Cu deposits and Mesozoic alkaline magma in XMO and its adjacent areas, is a product of dehydration melting, and is different from the Proterozoic peridotite xenoliths in Hannuoba and the Cenozoic asthenospheric mantle rocks. The study indicates that the source for the Mo-mineralized belt in the XMO is the Proterozoic lithosphere depleted in metals, water and LILEs, but was metasomatized and enriched in metals during dehydration by subduction of an oceanic plate beneath the North China Craton during the Paleozoic. The source for the Mo-mineralized belt in the XMO is a juvenile lithosphere formed by ocean subduction under the Siberian plate during Paleozoic. The comparative Sr-Nd isotopic study of the belts indicates that the ore-forming magma was generated from a region in the lithosphere with a low Rb/Sr ratio, which is interpreted as the active magma end-member. The magma was subsequently contaminated with the introduction of a high Rb/Sr source in the shallow part of lithosphere, which is considered to be the passive magma end-member. Although there are significant differences in Nd isotopes for the ore-forming magma between the two Mo mineralized belts, their Sm/Nd ratios are virtually the same averaging $0.19 \sim 0.17$. This indicates that the accumulation of radioactive Nd isotope was nearly the same between the ore-forming magmas of the two belts since the Triassic, and further indicates that the differences in initial Nd isotope values between the ore-forming magma of the belts was inherited from and formed in their source region before Mo mineralization was active. The difference of Nd isotopes between the two belts masks the true nature of the Mo mineralizing process in the two belts. Based on a comparative study of other Mo mineralization belts in the world, the authors hold that the source region for the Mo mineralization magma is located in SCLM. The Paleozoic oceanic subduction played a key role in the formation of the metal and water-fertile source region by re-hydrating, fertilizing (refertilizing) with ore metals and LILEs and by thickening the lithosphere. In spite of the fact that the resultant enriched, metasomatized and thickened lithosphere would have been chemically and lithospherically unstable, it had a re-stabilization trend by dehydration melting to make it chemically and lithospherically similar to the ancient and stabilized SCLM. A preliminary genetic model arguing that low degree of batch dehydration partial melting of metal-fertile and water and LILEs-enriched SCLM occurred under low heat flow environment in post-subduction tectonic setting is proposed for the formation of Mo mineralization magma, which would undergo significant crystallization differentiation, assimilation and contamination in the upper crust. The termination of dehydration melting of fertile SCLM means a termination of Mo mineralization, and the duration of dehydration melting defines the life span of giant hydrothermal mineralization in the Mesozoic post-subduction setting. This conclusion is consistent with the termination of Mo mineralization in Late Cretaceous (ca. 130 Ma) in XMO and

its adjacent areas. Based on the study of this paper, the authors propose that the Mesozoic Mo mineralization in the XMO and its adjacent areas was related to a post-subduction tectonic setting of the Paleozoic Paleo-Asian oceanic plate.

Key words: geology, porphyry Mo deposit, high F type, magmatic source, orogen hydration, metal reutilization, post-subduction metallogenesis, Xing'an-Mongolia Orogen, north margin of the NCC

斑岩型矿床是铜、钼等金属的最重要来源,常常呈巨型矿化带产出,如环太平洋的安第斯山斑岩铜矿化带和西南太平洋斑岩矿化带(Hedenquist et al., 1994; Candela et al., 2005; Sillitoe, 2010)。矿床作为巨量金属异常富集的产物,在一个地区大量集中地产出,绝非是一种孤立或者偶然的地质事件,而是地球动力学演化过程中特殊条件下、特殊阶段内的一种特殊的地质体。因此,其形成过程及其控制因素一直是矿床学家探讨的重点(如 Sillitoe et al., 2005; Groves et al., 2007; Sillitoe, 2010; 毛景文等, 2005; 陈衍景等, 2012; 侯增谦等, 2015; Chen et al., 2016)。就斑岩铜矿床而言,大洋板块俯冲是其主要产出环境(Sillitoe et al., 2005; Groves et al., 2007; Sillitoe, 2010)。它们的构造-岩浆-热液成矿模式已经比较成熟,强调了大洋板块在俯冲过程中的脱水及其对俯冲板块上方地幔楔的交代和改造,促使地幔楔的熔融,从而形成具有较高水含量(弧岩浆通常含水 $>6\%$)、较高氧逸度(成矿岩浆的 $f(\text{O}_2)$ 可高达 $\text{NNO}+2.2\text{NNO}$ 为 Ni-NiO)、地幔楔 $f(\text{O}_2)$ 可高达 $\text{QFM}+1.4$ (QFM 为铁橄榄石-磁铁矿-石英)较高硫含量(如爪哇岛弧基性包体中含硫 $350\times 10^{-6}\sim 2900\times 10^{-6}$,其下地幔楔中可能含硫 $256\times 10^{-6}\sim 465\times 10^{-6}$,并主要呈硫酸盐形式),以及较高亲硫金属元素的一套熔浆(如爪哇岛弧基性包体中含铜 190×10^{-6}) (Brandon et al., 1996; Carroll et al., 1985; De Hoog et al., 2001; Richards, 2003; Candela et al., 2005; Audétat et al., 2006)。大洋板块俯冲环境下斑岩铜矿床的构造-岩浆-热液成矿模式有效解决了斑岩成矿带形成过程中的一些关键问题,如成矿过程中所需金属、水和硫等配体的来源及富集机制问题,并可解释不同地质历史阶段下与板块俯冲活动有关的斑岩铜矿床的形成。斑岩钼矿床的产出环境和形成过程具多样性,根据其矿化特征和产出环境主要分为 2 种类型:与大洋板块俯冲有关的低 F 型钼矿床和与伸展活动有关的高 F 型钼矿床(White et al., 1981; Mutschler et al., 1981; Westra et al., 1981; Carten et al., 1988; Ludington

et al., 2009a; 2009b)。这两者中,高 F 型斑岩钼矿床以其巨大的规模、较高的品位(Wallace et al., 1993; Brooks et al., 2004; Ludington et al., 2009a; Chapin, 2012)和独特的成矿作用,往往更受到矿床学家的重视。但由于缺乏同时代大洋板块的俯冲环节为其提供巨量的金属、流体及其他配体,因此对其形成过程,尤其是成矿岩浆的源区、属性、演化过程以及钼的富集机制等方面,研究程度远不能与大洋板冲环境中产出的斑岩型铜矿床可比。

中国是一个钼资源量丰富的国家。据美国地质调查局的统计数据显示,中国从 2007 年以来已经超越智利成为世界第一钼矿产量大国(USGS, 2009)。秦岭造山带的钼矿床非常发育,构成了一个世界级的钼矿带(Mao et al., 2011; 陈衍景等, 2012)。在兴蒙造山带及相邻的华北板块北缘也产出有大量的大型、超大型斑岩钼矿床,如岔路口、曹四天和查干花等斑岩钼矿床(刘翼飞等, 2011a; 2012b; 聂凤军等, 2013; Liu et al., 2014; Wu et al., 2017)等。前人对兴蒙造山带及华北板块北缘钼矿床的成因开展了大量的研究,尤其从成矿环境角度方面开展了大量的探讨(毛景文等, 2005; 陈衍景等, 2012; Zeng et al., 2013; Jiang et al., 2014; 侯增谦等, 2015; Chen et al., 2016)。本文在总结前人认识的基础上,对兴蒙造山带及华北板块北缘的 2 条钼成矿带的成矿背景、分布规律、矿床共生组合特点、矿床的分类等进行了总结,并通过对比的方法来分析这 2 条钼成矿带成因上的一些科学问题,着重从成矿岩浆源区塑造过程的角度来初步探讨它们的成因。

1 钼矿化的研究进展

1.1 钼矿化的类型及其构造专属性

自从 20 世纪 80 年代以来,国际上的矿床学家就已经开始对斑岩钼矿床的分类进行认真的思考。尽管有不同的方案,但是大多依据矿床的构造环境、产出特点和成矿岩浆的属性来对矿床进行划分。Sillitoe(1980)根据成矿环境的差异将钼矿床划分为

裂谷型和俯冲带型 ;Mutschler 等(1981)依据成矿岩体的属性将钼矿床分为花岗闪长岩型和花岗岩型 ; White 等(1981)也根据成矿岩浆的属性将斑岩钼矿床划分为 Climax 型(花岗岩型)和石英二长岩型 , Westra 等(1981)则通过定量的地球化学方法 ,将斑岩钼矿床分为钙碱性斑岩钼矿床、碱钙性斑岩钼矿床及碱性斑岩钼矿床。尽管分类的名称有所不同 ,但是上述几种分类方案是对应一致的。俯冲带型、花岗闪长岩型、石英二长岩型与钙碱性钼矿床是一致的 ,而裂谷型、花岗岩型、Climax 型则与碱钙性及碱性钼矿床是一致的。Ludington 等(2009a ;2009b)将它们分别称为低 F 型和高 F 型斑岩钼矿床。由于 F 含量是区分 2 类矿床比较直观的方法 ,可以通过矿床中萤石的含量以及一些副矿物中的 F 含量来进行简单的区分 ,因此本文采用高 F 型和低 F 型的分类方法 ,对比了 2 类斑岩(-矽卡岩)钼矿床的特征 (表 1)。

目前被归为低 F 型的斑岩钼矿床主要产于加

拿大及美国西北部的科迪勒拉山系 ,但系统性的研究工作还相对缺乏。现有的资料表明 ,低 F 型斑岩钼矿床本身含有一定的铜 ,或者与同时代的斑岩铜矿床共生产出 ,其形成主要与陆缘弧构造环境有关 (Ludington et al. , 2009b)。高 F 型斑岩钼矿床主要产于伸展构造环境 ,如美国科罗拉多地区 Rio Grande 裂谷内产出的新生代斑岩钼矿带(white et al. , 1981) ,东格陵兰火山-离散大陆边缘(Volcanic-rifted margin)产出的古近纪斑岩钼矿带(Brooks et al. , 2004) ,挪威 Oslo 大陆裂谷中产出的二叠纪斑岩钼矿带(Schönwandt et al. , 1983) ,中国华北板块南缘晚侏罗世至早白垩世形成的斑岩钼矿床(Mao et al. , 2011) ,华北板块北缘产出的部分斑岩钼矿床 (Zeng et al. , 2011 ;2012 ; Zhang et al. , 2009 ;陈衍景等 2012)。这样一些伸展构造环境 ,可以是威尔逊旋回中的不同阶段 ,如板块俯冲停止后伸展阶段——美国科罗拉多地区的 Rio Grande 裂谷 ,如大陆裂谷——东格陵兰火山-离散大陆边缘和

表 1 高 F 型和低 F 型斑岩钼矿床特征对比表
Table 1 Geological characteristics for high-F and low-F types of porphyry Mo deposits

特征	高 F 型钼矿床	低 F 型钼矿床
成矿背景	裂谷	陆缘弧
同生侵入岩	花岗岩、二长岩、正长岩、淡色花岗岩	花岗闪长岩、石英闪长岩、石英二长岩、花岗岩
岩浆系列	高钾钙碱性和碱性	钙碱性，高钾钙碱性
岩体期次、形态和斑状结构	多期次侵位的斑岩岩株，大部分具有斑状结构，少数没有明显的斑状结构	多期次演化的闪长岩或石英二长岩岩基，或其晚期分异的岩株，部分有斑状结构，部分没有斑状结构
元素特征	$w(\text{SiO}_2)>75\%$ （少量碱性岩在 61%~65%之间）， $w(\text{K}_2\text{O})>4\%$ （通常>5%）， $w(\text{Na}_2\text{O})<3.6\%$ ， $w(\text{TiO}_2)<0.2\%$ （碱性岩可>0.5%）， $w(\text{Rb})=200\times10^{-6}\sim800\times10^{-6}$ ， $w(\text{Sr})<125\times10^{-6}$	$w(\text{SiO}_2)<75\%$ ， $w(\text{TiO}_2)>0.1\%$ （通常>0.2%）， $w(\text{Rb})=100\times10^{-6}\sim350\times10^{-6}$ ， $w(\text{Sr})=100\times10^{-6}\sim800\times10^{-6}$
辉钼矿含量	辉钼矿含量相对较高（但边界品位经济环境有关）	辉钼矿含量相对较低（但边界品位经济环境有关）
伴生成矿元素	浅部常有铅锌银矿化，常伴生锡石、黑钨矿	可出现白钨矿，但是通常不出现锡石矿化
含氟矿物	成矿岩浆中 $w(\text{F})$ 较高，可达 0.5% 以上，并形成大量萤石，常出现黄玉，黑云母及其他副矿物常含 F，如岩浆黑云母和磷灰石的 $w(\text{F})$ 分别可达 3% 及 4%~8%	成矿岩浆中 $w(\text{F})$ 较低，一般在 0.25% 以下，绢英岩化带可出现萤石，但通常不含黄玉
铜钼比值	1:100~1:50	1:30~1:1
与斑岩铜矿化的共生关系	不与同时代的斑岩铜矿床共生，钼矿化中的铜矿化非常少见	通常与同时代的斑岩铜矿床共生，钼矿化中也含少量的铜矿化
实例	美国的 Climax、Urad-Hendson、Questa 和 Mount Hope，格陵兰的 Malmberg 以及挪威 Oslo 地区的斑岩钼矿化	加拿大的 Endako、Kitsult 和 Adanac，美国的 Thompson Creek 和 Cannivan 矿床

注：本表所述特征根据 Mutschler 等(1981)，Westra 等(1981)，White 等(1981)，Carten 等(1993)和 Ludington 等(2009a ;2009b)文献总结。

挪威 Oslo 大陆裂谷,但是伸展是它们共同的特征。

1.2 钼矿化成矿岩浆的属性 and 源区

高度分异的成矿岩浆。伸展构造环境下产出的高F型斑岩钼矿床的成矿岩浆具有高度分异的特征,总体表现为:①成矿岩浆一般发育于大规模、强烈岩浆活动周期的晚期,如与美国 Rio Grande 裂谷、挪威奥斯陆大陆裂谷和东格陵兰大陆裂解岩浆活动有关的钼矿化(Schönwandt et al., 1983; Aldrich et al., 1986; Perry et al., 1987; Brooks et al., 2004; Moucha et al., 2008; Ludington et al., 2009a; Berglund et al., 2012);②矿化常常产出多期、多相的复式火成杂岩体,岩性主要为高分异的I型、过铝质S型及过碱性花岗岩,通常非常富钼,为高钾钙碱性及钾玄岩系列(Mutschler et al., 1981; White et al., 1981; Westra et al., 1981; Mao et al., 2011);③微量元素也显示出高度演化的特征,如美国科罗拉多地区的 Climax 型斑岩钼矿床成矿岩体中通常含 $(200 \sim 800) \times 10^{-6}$ 的 Rb,同时也非常富集 F(Westra et al., 1981; Ludington et al., 2009a; Mercer et al., 2015)。最近的熔体包裹体原位成分研究显示,这种富集大离子亲石元素的特征是成矿岩浆演化的结果(Lerchbaumer et al., 2013; Audétat et al., 2008; 2011; Zhang et al., 2012; Audétat, 2010, 2015)。

成矿岩浆及物质的源区。高F型钼矿床成矿岩浆和成矿物质的来源一直存在较大争议。上地壳可能成为钼的来源,Os 同位素研究显示,奥斯陆裂谷内太古代—古元古代绿片岩相至麻粒岩相变质作用可能形成辉钼矿(Bingen et al., 2003; Stein, 2006)。基于 Sr、Nd、Pb 同位素的研究,大量科学家认为下地壳是成矿岩浆和金属的源区(Candela et al., 2005; Seedorff et al., 2005; Sinclair, 2007; Chapin, 2012),但 Sr、Nd、Pb 同位素很难区分富集的陆下岩石圈地幔和下地壳源区(Pettke et al., 2010)。因此,最近的研究者倾向于用元素性质及其在地幔、陆壳中的丰度和比值来探讨成矿物质的源区。研究显示,如果成矿物质来源于下地壳,那么 Mo/Rb 比值将低于 0.013~0.009,但熔体包裹体成分分析显示 Mo/Rb 比值远高于地壳来源的合理范围(最高达 0.033),而且在 Mo 对 Rb 和 Mo 对 Cs 图解(图1)中通常延伸至 OIB 的范围,因此,交代的陆下岩石圈地幔被认为更有可能是高F型钼矿床成矿岩浆和金

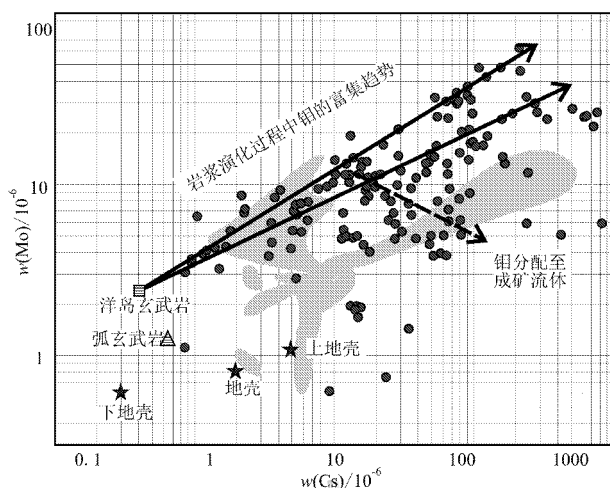


图1 熔体包裹体中 Mo 与 Cs 含量之间的关系图(灰色区域为俯冲环境岩浆中 Mo 与 Cs 的分布区域,据 Lerchbaumer et al., 2013; Audétat, 2015)

Fig. 1 Mo versus Cs concentration of melt inclusions from Mo- and Cs-mineralized granites and porphyries (after Lerchbaumer et al., 2013; Audétat, 2015)

属的源区(Audétat, 2010, 2015; Audétat et al., 2011; Lerchbaumer et al., 2013)。这种认识也被熔体包裹体的 Pb 同位素研究所证实(Pettke et al., 2010)。云母类、磁铁矿、钛铁矿等矿物含有较高的 Mo、W、Pb 和 Zn 等元素,富含这些矿物的岩石在脱水部分熔融及变质作用过程中能够释放大量的成矿元素,从而为成矿岩浆提供金属物质(Bingen et al., 2003; Mercer et al., 2015)。也有研究认为,富 Mo 沉积物(岩)在随板块俯冲到地幔或深埋等条件下发生部分熔融也可能形成富 Mo 的原始岩浆(孙卫东等, 2015)。

高F型钼矿床含有较高的 F 是其重要特点。成矿岩浆中 $w(F)$ 可达 0.5%~1%,例如 Climax 成矿期石英斑晶中的熔体包裹体 $w(F)$ 平均为 3.5%,Henderson 矿区成矿前火山岩石英斑晶中的熔体包裹体 $w(F)$ 也达到 $3300 \times 10^{-6} \sim 9800 \times 10^{-6}$ (图2, Audétat, 2015; Mercer et al., 2015)。黑云母在成矿岩体中的含量通常较高,因此是主要的富 F 矿物相,其 $w(F)$ 可达 3%~8%,其他的一些副矿物如黄玉、磷灰石均可能含有较高的 F(Westra et al., 1981; Carten et al., 1988; Ludington et al., 2009a; Mercer et al., 2015; Audétat, 2015; Sun et al., 2015)。虽然前人对于 F 的源区的研究较少,但对于 Cl 的来源却做了较多的研究。研究认为俯冲过程中的脱水

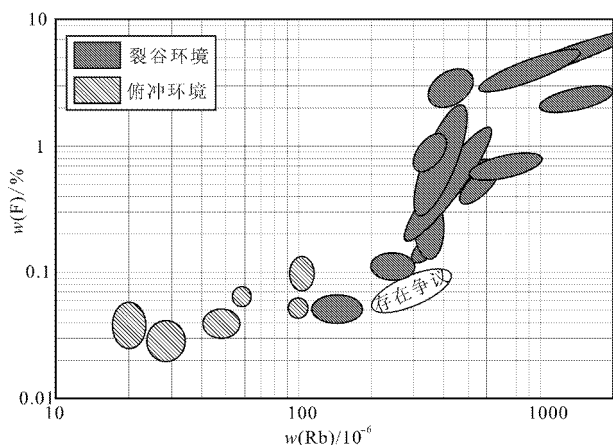


图2 不同分异程度(以 Rb 含量作为指标)熔体包裹体中 F 的含量(据 Audétat, 2015)

Fig. 2 Degree of melt fractionation (indicated by Rb) versus fluorine content of rhyolitic melt inclusions from different tectonic settings (after Audétat, 2015)

流体含有较高的 Cl,很可能是弧后盆地火山岩中 Cl 的主要来源(Sun et al., 2007),俯冲结束后的科罗拉多 Rio Grande 裂谷玄武岩中的 Cl 很可能来源于俯冲结束前 Farallon 板块脱水交代的陆下岩石圈地幔(Rowe et al., 2009)。由于 F 和 Cl 均为卤素元素,具有相似的地球化学属性,因此 F 和 Cl 通常在成矿岩浆中同步演化,如 Henderson 钼矿区火山熔岩中石英斑晶的熔体包裹体内同样含有较高的 Cl ($2300 \times 10^{-6} \sim 3500 \times 10^{-6}$, Mercer et al., 2015),因此 F 和 Cl 可能有类似的来源(但流体出溶阶段 F 和 Cl 在流体/熔体间的分配系数相差较大, F 趋向于分配至熔体, Cl 趋向于分配至流体)。Henderson 矿区钾镁煌斑岩中的黑云母也含有较高的 F,因此,高 F 型斑岩钼矿床成矿岩浆中的 F 通常被认为是同岩浆来源,是岩浆演化过程中逐渐富集的结果(Mercer et al., 2015),很可能也来源于受交代的陆下岩石圈地幔。

1.3 钼矿化成矿岩浆的形成和演化

成矿岩浆的形成。如上所述,最近研究结果认为高 F 型钼矿床的成矿岩浆更有可能来源于陆下岩石圈地幔,伸展环境下的低程度减压部分熔融可能是碱性岩浆形成的有效机制(Ro et al., 1992; Anthony et al., 1989; Neumann et al., 2002; Wilson, 2005; Corfu et al., 2008; Moucha et al., 2008; Wijk et al., 2008)。在这个过程中,交代的陆下岩石圈地幔(由金云母、斜方辉石、单斜辉石、角闪石组成的方

辉橄榄岩)经脱水熔融可以形成类岛弧微量元素分布特征的富碱性岩浆(Pettke et al., 2010)。这些富碱性岩浆在就位到地壳浅部的过程中(可能有 15~33 km 深),将在下地壳不同深度发生停滞形成岩浆房,并和围岩进行热交换和物质的混染(Quadt et al., 2011)。深部基性碱性岩浆的周期性注入造成的热扰动将有利于不同深度的岩浆房内岩浆的演化和分异,并最终形成上地壳更富集地幔不相容元素的流纹质高分异型近矿岩浆房(13~8 km)。深部岩浆的注入也将维持缓慢结晶的动力学环境,为大规模岩浆房中成矿元素分配至晚期残余熔体提供充分的演化时间(Shinohara et al., 1995; Lerchbaumer et al., 2013)。也有研究认为碱性岩浆的水含量相对较低,需要较高的熔融温度才能形成,俯冲板块的断离、岩石圈拆沉及伸展作用对于中国东北地区不同时期的 A 型花岗岩的形成有重要作用(Wu et al., 2002)。

成矿岩浆的演化。大规模的岩浆房和成矿物质在晚期富水熔体中的富集是高 F 型钼矿床得以形成的 2 个重要条件。与俯冲环境斑岩矿床成矿岩浆相比,高 F 型钼矿床成矿岩浆具有较低的 Mo 饱和溶解度($< 20 \times 10^{-6} \sim 27 \times 10^{-6}$),因此,岩浆房规模的大小是影响斑岩钼矿床规模的重要因素,具有经济价值的钼矿床的岩浆房一般规模达到 $40 \sim 180 \text{ km}^3$ (Lerchbaumer et al., 2013; Audétat, 2015; Mercer et al., 2015)。钼成矿流体出溶前的成矿熔体的成分总体上为流纹质,含有较高挥发分($w(H_2O) \geq 5\%$, $w(F) \geq 0.5\%$, $w(Cl) \geq 0.03\%$ 和 $w(CO_2) \leq 600 \times 10^{-6}$),以及富集大离子亲石元素和成矿元素($w(Mo) = 7 \times 10^{-6} \sim 24 \times 10^{-6}$, $w(W) = 4 \times 10^{-6} \sim 14 \times 10^{-6}$, $w(Pb) = 21 \times 10^{-6} \sim 52 \times 10^{-6}$, $w(Zn) = 28 \times 10^{-6} \sim 2700 \times 10^{-6}$),流体出溶时可能演化成极为富水、F 和金属的熔体($w(H_2O) \geq 7.5\%$, $w(F) \geq 6.6\%$, $w(Mo) = 100 \times 10^{-6}$) (Lowenstern, 1994; Klemm et al., 2008; Audétat, 2015; Mercer et al., 2015)。在熔体压滤和晶体沉降机制的作用下,成矿岩浆在演化过程中经历了显著的结晶分异,可能有 45%~55% 甚至 60%~70% 的晶体分离(可能有石英、长石和黑云母),也伴随着显著的减压去气作用(如 CO_2 的去气作用) (Mercer et al., 2015)。因为 Mo 在碱性硅酸盐熔体中主要以高价态的 MoO_4^{2-} 形式存在(Farges et al., 2006a, 2006b),不会以 Mo^{4+} 的形态分配到钛铁氧化物的晶格而结晶分

离,因此,在岩浆演化过程中能够持续的富集 (Lowenstern et al. ,1993 ;Audétat et al. ,2010) ,这个过程也是大离子亲石元素、其他成矿元素以及 F 等配体得以持续、有效的富集的过程(图 1、图 2)。值得注意的是 ,Mo 矿成矿岩浆演化过程中形成的一些副矿物的含量虽然不是很高,但 Mo 在这些矿物与岩浆之间具有较高的分配系数(如磁铁矿、钛铁矿和黑云母 , $D_{Mo, 矿物/熔体}$ 分别为 29、11 和 2) ,因此这些副矿物的分离将显著影响残余熔体中的 Mo 含量 (Candela et al. ,1990 ;Lowenstern et al. ,1993 ;Mercer et al. ,2015)。结晶分异作用虽然是成矿元素富集的重要因素,但并不是辉钼矿沉淀的主要机制 (Audétat et al. ,2011) ,由于 Mo 在流体和熔体之间具有较高的分配系数($D_{Mo, 流体/熔体} = 17 \sim 20$, Audétat ,2010 ;2015 ;Mercer et al. ,2015) ,在岩浆晚期大量富集的 Mo 会随着流体的出溶进入流体相中,并沉淀为辉钼矿(图 2)。

在成矿岩浆演化的过程中,成矿岩浆如何从岩浆房就位到矿化区域,前人对此进行过多种模式的探讨,如含矿流体在浮力作用下的上升模式、含矿流体的对流模式以及含矿岩浆的对流模式 (Shinohara et al. ,1995)。富含挥发分的含矿岩浆的对流被认为

为是最为有效的模式,它们主要以晶粥的形态(如 7%的水(质量分数)以及 30%的斑晶(体积分数) ,其余为熔体)从深度大于 8~13 km 的岩浆房开始上升,并在上升过程中不断地去气和结晶,去气后的岩浆由于密度较高,在对流过程中下降回到岩浆房。成矿岩浆将最终到达浅部 2~4 km 的矿化区域,由于晶体含量的增加,成矿岩浆逐渐变成刚性 (Shinohara et al. ,1995 ;Mercer et al. ,2015)。而深部岩浆的周期性注入,将维持深部岩浆房较慢的结晶速度,并有利于成矿岩浆房的对流以及成矿流体在顶部的释放 (Hildreth et al. ,1988 ;Harry et al. ,1995 ;Pettker et al. ,2010 ;Mercer et al. ,2015) ,也保持岩浆房处在未固结或半固结的状态,使得成矿元素不至于被结晶相‘锁死’而无法分配至后期出溶的流体之中。

岩浆的氧逸度($f(O_2)$)和含水量是影响钼在岩浆演化过程中富集或者分离的关键参数(图 3a、b)。较低的 $f(O_2)$ 有利于 Mo 元素的富集过程 (Candela et al. ,1984 ;Zajacz et al. ,2008 ;Herd ,2008 ;Jugo et al. ,2010 ;Audétat et al. ,2011 ;Zhang et al. ,2012)。研究显示,高 F 型斑岩矿床成矿岩体的石英斑晶中可见磁铁矿和钛铁矿的共生组合,显示成矿岩浆的 $f(O_2)$ 主要在 NNO 附近,显著低于斑岩

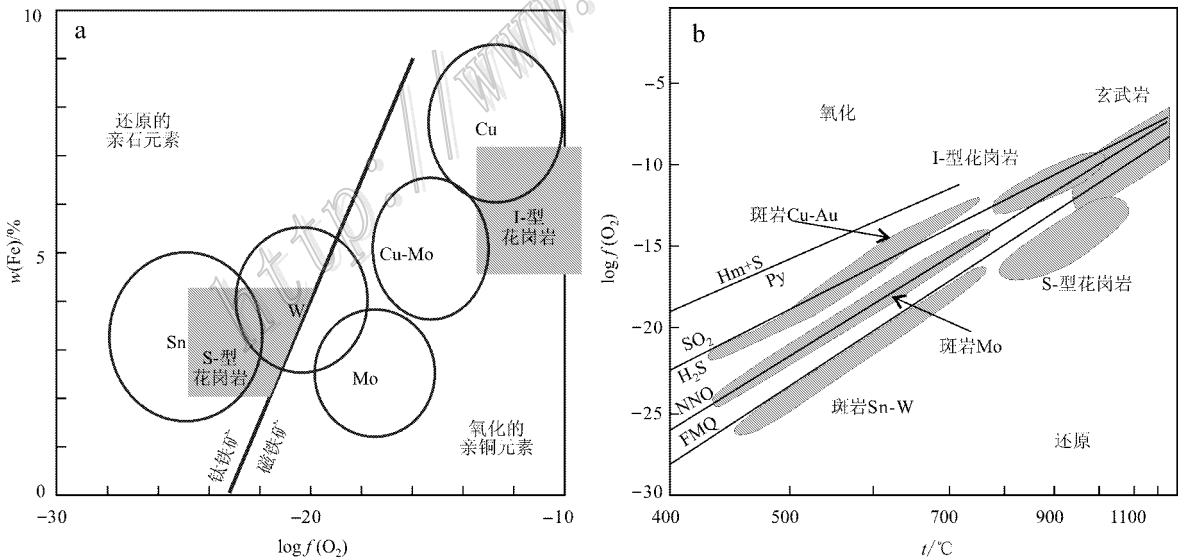


图 3 不同类型斑岩矿床成矿岩浆的 $\log f(O_2)$ - $w(Fe)$ 图解 (a)和 t - $\log f(O_2)$ 图解 (b) (据 Vigneresse ,2007 ;Audétat ,2011 ;Mercer et al. ,2015 修改)

NNO 为 Ni-NiO ,FMQ 为铁橄榄石-磁铁矿-石英

Fig. 3 Diagram of Fe and redox conditions shown by $\log f(O_2)$ - $w(Fe)$ (a) and $f(O_2)$ - t (b)

drawn as a function of temperature for porphyry ore system and related magma (modified after Vigneresse ,2007 ;

Audétat ,2011 ;Mercer et al. ,2015)

NNO is Ni-NiO ,FMQ is fayalite-magnetite-quartz

Cu-Au 矿床的成矿岩浆的 $f(\text{O}_2)$ $\text{H}_2\text{S}-\text{SO}_2$ 界面,图 3b, Mercer et al., 2015)。当 $f(\text{O}_2) \gg \text{NNO}$ 时,四价钼在熔体中的比例将增加并将分配到结晶分离的铁钛氧化物中,进而降低钼在熔体中的含量。同时,由于在硅酸盐熔体中钼主要以 MoO_4^{2-} 的形式存在,但 H_2MoO_4 具有挥发性,较低 $f(\text{O}_2)$ 的碱性岩浆也可以防止钼在早期岩浆演化中挥发,进而使钼不断地富集 (Lowenstern et al., 1993)。虽然较低的 $f(\text{O}_2)$ 和逐渐降低的温度使得 Mo 在成矿岩浆中具有更低的饱和浓度,因此,钼在 $f(\text{O}_2)$ 较高的俯冲环境斑岩铜-钼矿床的成矿岩浆内通常达不到不饱和状态,而在 $f(\text{O}_2)$ 较低的高 F 型钼矿床的成矿岩浆中则常常达到饱和 (Lowenstern et al., 1993; Audétat et al., 2011)。但对于高 F 型钼矿床来说,成矿岩浆房具有较大规模并含有大量的挥发分,因此,在成矿岩浆演化的晚期有流体不断出溶的情况下,岩浆中的钼将大量分配到流体之中。同时,钼从熔体相分配至流体相也会打破结晶相与熔体相之间钼的平衡分配,进而减少钼在分离结晶矿物中的分配,因此,即使 Mo 在岩浆中达到饱和,成矿系统内 $>95\%$ 的 Mo 将最终分配至熔体相中 (Lowenstern et al., 1993),并最终分配至出溶的流体相内。这也说明岩浆房具有较高水含量,并在岩浆房没有完全固结的情况下达到水过饱和并有流体出溶,是促使 Mo 大量分配至成矿热液中的关键。

热液出溶后, $f(\text{O}_2)$ 和 $f(\text{S}_2)$ 温度和 pH 值是影响 Mo 在溶液中溶解度的重要参数。Mo 在 NaCl 水溶液中的溶解度将随着 $f(\text{O}_2)$ 温度和盐度的上升而上升,随着 $f(\text{S}_2)$ 的上升而下降,随着 pH 值的下降而下降 (Audétat et al., 2003; Zhang et al., 2012),因此,出溶后的热液如果具有较高的 $f(\text{O}_2)$,将使 Mo 更为有效地分配至流体相。在兴蒙造山带及华北板块北缘内,超大型斑岩钼矿床 (>100 万吨 Mo, 如岔路口和曹四夭) 与规模相对较小的斑岩钼矿床 (如查干花) 相比,在早期的热液阶段往往有更大量的磁铁矿沉淀,显示成矿热液具有相对更高的 $f(\text{O}_2)$ 。

F 在成矿岩浆演化中的作用。虽然 F 在岩浆中不与 Mo 组成络合物并影响 Mo 的分配 (Tingle et al., 1984; Farges et al., 2006b),但 F 在成矿岩浆的演化中具有重要的作用。研究显示,成矿岩浆中的 $\omega(\text{F})$ 一般 0.5% ,平均能达到 3.5% ,流体出溶时熔体 $\omega(\text{F})$ 可达 6.6% ,成矿后岩浆 $\omega(\text{F})$ 降低到 1.1% 以下 (Audétat, 2015)。岩浆中相同含量的 F 比相同

含量的水能更有效的降低岩浆的固相线及粘度,增加熔体中水的溶解度,降低岩浆的结晶温度,进而延长岩浆的演化时间,并促进岩浆的分异和钼的富集,同时也使成矿岩浆更容易上升,方便晚期流体的出溶 (Manning, 1981; Westra et al., 1981; Tingle et al., 1984; Lowenstern et al., 1993; Scaillet et al., 2004; Mercer et al., 2015)。F 在流纹质熔体中比流体中具有更高的分配系数,因此在流体出溶以后, F 仍将主要存在于熔体中并维持熔体较低的粘度和固相线 (Mercer et al., 2015),进而有利于成矿岩浆的演化。

2 兴蒙造山带及华北板块北缘钼矿化——背景、现象与规律

2.1 成矿地质背景

板块俯冲过程中构造-岩浆活动将对俯冲方向一侧的大陆产生重要的影响,正如我们现在所观察到的太平洋板块 (以及太平洋洋中脊东侧已俯冲殆尽的大洋板块) 的俯冲在南、北美大陆上形成了宽阔的陆缘弧造山带一样,虽然古亚洲洋是否向南俯冲有过争议,但是目前大部分研究认为存在古亚洲洋的向南俯冲 (王荃等, 1991; Davis et al., 2001; Xiao et al., 2003; Xu et al., 1997; Zhang et al., 2007a; 2007b),因此古生代期间古亚洲洋的南向俯冲也必然对其南侧的华北克拉通产出巨大的影响。有研究认为,这个过程中带入物质的活化可能对华北克拉通北缘火山岩源区物质组成产生重要的影响 (周新华等, 2001),也有研究显示,中生代的华北克拉通中央陆下岩石圈地幔被改造程度比边缘要轻,因此这种改造被认为是环绕华北克拉通的俯冲所致 (Zhang et al., 2003)。因为上述原因,本文研究的范围包括 2 大构造单元:一是兴蒙造山带,二是兴蒙造山带南侧可能受到古生代古亚洲洋俯冲改造的华北板块北缘地区 (图 4)。

华北板块是中国最古老的克拉通之一,其北缘经历了新太古代结晶基底的形成,古元古代克拉通的拉伸-破裂事件以及其后的闭合、拼合及被动大陆边缘的裂解,和中新元古代的多期裂谷事件 (Zhai et al., 2011; Zhao et al., 2012)。兴蒙造山带则属于中亚巨型造山带的东段,是古亚洲洋向西伯利亚板块和华北板块两侧逐渐俯冲增生并最后闭合的结果,并在古生代末期至中生代期间经历了显著的构

造体制转换,由古亚洲洋的俯冲构造体制逐渐转换为伸展构造体制,但是具体的时限还存在争议(Jahn et al., 2000; Xiao et al., 2003; Meng, 2003; Li, 2006; Zhang et al., 2007a; 2007b; Chen et al., 2009; 赵越等, 2010; Wang T. et al., 2011; Xu et al., 2013, 2015; 许文良等, 2013)。局部地区可能受到鄂霍次克洋构造域和太平洋构造域叠加改造作用(Wu et al., 2006; Guo et al., 2010; Tomurtogoo et al., 2005; 许文良等, 2013)。

古亚洲洋闭合后,兴蒙造山带及相邻的华北板块北缘地区进入了以伸展为主的构造体制,并在古生代末期至中生代期间形成了大量的高分异型、A 型花岗岩及碱性侵入岩(后称为富碱性侵入岩带,牟保磊等, 1992; 阎国翰等, 2000, 2001, 2002, 2007; Jahn et al., 2001; Wu et al., 2002, 2003a, 2003b; Meng, 2003; 石玉若等, 2007; 任康绪等, 2004; Kovalenko et al., 2006; 陈志广等, 2008; 任荣等, 2009; 童英等, 2010; 牛晓露等, 2016)及双峰式火山岩(林强等, 2003)。从其中富碱性侵入岩的分布来看,构成了南、北 2 条巨型的碱性岩带,一条为北部带,由二连浩特和东乌珠穆沁旗一直延伸至大兴安岭北段,并经小兴安岭延伸至张广才岭,另一条沿着华北板块北缘展布(童英等, 2010; Zhao et al., 2016)。2 条富碱性侵入岩带最终在辽宁东部相互衔接。虽然这 2 条富碱性岩带内的不同侵入体及可能涉及到不同的成因模型(Wu et al., 2002; Yang et al., 2006, 2008, 2012; Zhao et al., 2016),但它们一致具高分异、富碱、富集大离子亲石元素、明显的负 Eu 异常特征,显示出成岩过程中经历了明显的结晶分异过程(Jahn et al., 2000; Wu et al., 2003a),同时作为整体也与南、北 2 条钼成矿带的产出具有紧密的时空一致性。另外值得注意的是,新生代期间在兴蒙造山带及邻近的华北板块北缘发育了一套碱性火山岩带,叠加产出于 2 条富碱性侵入岩带内,也与南、北 2 条钼成矿带的空间分布范围大体一致(Li et al., 2016; Guo et al., 2016)。

2.2 钼矿化的时空分布及其与斑岩铜矿化的时代不共生性

兴蒙造山带及其华北板块北缘钼矿化极为发育,目前至少发现 40 余处钼矿床(点),其中含 100 万吨钼资源量的矿床 3 处,含 10 万吨以上不足 100 万吨钼资源量的矿床达 16 处,这 19 处规模型矿床(钼金属量 > 10 万吨)含钼资源量约 888 万吨(表 2,

图 4)。由于这些钼矿床分别产于兴蒙造山带以及可能受到古生代古亚洲洋俯冲改造的华北板块北缘及北缘增生带,可分为南成矿带和北成矿带。这些钼矿床大部分为斑岩型,如岔路口、曹四夭和大黑山,其钼资源量约占 94%,部分为矽卡岩型,如翠宏山、杨家杖子和肖家营子。近年,陈衍景等(2012)、Zeng 等(2012, 2013)、Jiang 等(2014)和 Chen 等(2016)已经对该区产出的钼矿化的地质特征进行了大量的总结,因此本文主要从钼矿化时空分布、与区域内斑岩型铜矿床的时代不共生性、钼矿化的长期性和整体性、与钼矿化有关的区域矿床共生组合、区域的矿化分带以及钼矿化的分类等方面进行总结。

兴蒙造山带及华北板块北缘型钼矿化主要形成于中生代期间,但从晚古生代期间已经开始形成。近些年的勘查结果显示,在古亚洲洋向北俯冲形成的增生带内产出有一条北东向的钼成矿带,并由小兴安岭向南延伸至张广才岭(图 4,表 2)。目前,在该钼成矿带发现的最早的斑岩钼矿点为准苏吉花, Re-Os 等时线年龄为 (298.1 ± 3.6) Ma,为早二叠世(刘翼飞等, 2012b),而大规模钼矿化开始于早三叠世,如宝格达乌拉(必鲁甘干)斑岩钼矿床,与矿化有关的似斑状花岗岩的侵位年龄为 (240.9 ± 2.5) Ma(刘勇等, 2012; 李俊建等, 2016),侏罗纪及白垩纪是最重要的钼矿化时期,形成了如迪彦钦阿木大型斑岩钼矿床(Sun et al., 2014, 2015; Leng et al., 2015),岔路口超大型斑岩钼矿床(刘翼飞等, 2011a; 聂凤军等, 2011; Li et al., 2014; Liu et al., 2014; 胡新露等, 2014; 金露英等, 2014)及兴阿大型斑岩钼矿床(张成等, 2013)。

在华北板块北缘及古亚洲洋向南俯冲的增生带内,晚中三叠世是钼矿化大爆发式成矿的重要时期,形成了大量的斑岩(-矽卡岩)型钼矿床,构成了一条近东西向的钼成矿带(图 4)。如撒岱沟门斑岩钼矿床形成于 (236.5 ± 2.2) Ma(Jiang et al., 2014),大苏计斑岩钼矿床形成于 (222.5 ± 3.2) Ma(张彤等, 2009),西沙德盖斑岩钼矿床形成于 (226.4 ± 3.3) Ma(侯万荣等, 2010a)。侏罗纪及早白垩世是该地区斑岩钼矿床形成的顶峰阶段,如兰家沟斑岩钼矿床形成于 (181.6 ± 6.5) Ma(黄典豪等, 1996; Han et al., 2009),大黑山斑岩钼矿床形成于 (168.2 ± 3.2) Ma(王成辉等, 2011),肖家营子斑岩-矽卡岩型钼矿床形成于 (165.5 ± 4.6) Ma(Dai et al., 2009),鸡冠山斑岩钼矿床形成于 (155 ± 2) Ma(曾庆栋等, 2009),曹

表 214 兴蒙造山带及邻区代表性钼矿床地质特征一览表

Table 2 Geological feature of typical Mo deposits in Xing'an-Mongolia orogen and its adjacent area

矿带及矿床	围岩	(含)成矿岩体	资源量@品位	成岩成矿时代	资料来源
南矿带					
查干花	古元古界宝音图群二云石英片岩为主	似斑状黑云母二长花岗岩	52.5 万吨 Mo @ 0.104%	锆石 U-Pb 年龄 253 Ma; 辉钼矿 Re-Os 等时线年龄 (243.2±1.8) Ma	蔡明海等, 2011a; 2011b; 刘翼飞等, 2012a
大苏计	太古代界麻岩、磁铁石英岩和角闪岩	花岗斑岩、石英斑岩和正长斑岩	20 万吨 Mo @0.082%	辉钼矿 Re-Os 等时线年龄 (222.5±3.2) Ma	张彤等, 2009
撒岱沟门	元古界片麻岩和混合岩	似斑状二长花岗岩	18.7 万吨 Mo @ 0.076%	辉钼矿 Re-Os 等时线年龄 (236.5±2.2) Ma	Jiang et al., 2014
兰家沟	寒武系灰岩	花岗斑岩	22 万吨 Mo@ 0.13%	辉钼矿 Re-Os 等时线年龄 (181.6±6.5) Ma	黄典豪等, 1996; Han et al., 2009
杨家杖子	侏罗纪中粗粒钾长花岗岩、似斑状钾长花岗岩	似斑状钾长花岗岩	26.2 万吨 Mo@0.14%	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄: 181 Ma	Han et al., 2009; 徐学纯等, 2015
大黑山	早古生界变质砂岩及中性火山岩	花岗斑岩和石英斑岩	109 万吨 Mo @ 0.066%	SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 (170±3) Ma; 辉钼矿 Re-Os 等时线年龄 (168.2±3.2) Ma	王成辉等, 2009
肖家营子	太古界建平群变质岩, 古生界海相碳酸盐及海陆交互相沉积岩	辉长辉绿岩、中粒闪长岩及似斑状细粒闪长岩	10.5 万吨 Mo @ 0.288%	辉钼矿 Re-Os 等时线年龄 (165.5±4.6) Ma	Dai et al., 2009
鸡冠山	二叠系变火山岩、板岩和大理岩	花岗斑岩、石英斑岩和流纹斑岩	10 万吨 Mo @0.1%	SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 (151±1) Ma	曾庆栋等, 2009; Zeng et al., 2012
曹四天	太古界片麻岩、磁铁石英岩和角闪岩	花岗斑岩、石英斑岩和正长斑岩	132.8 万吨 Mo @0.103%	辉钼矿 Re-Os 模式年龄平均值: 148 Ma	聂凤军等, 2013
北矿带					
宝格达乌拉 (必鲁甘干)	二叠系碎屑岩和角岩	似斑状黑云母花岗岩	40.8 万吨 Mo @0.084%	SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 (240.9±2.5) Ma; 辉钼矿 Re-Os 等时线年龄 (237.9±1.7) Ma	刘勇等, 2012; 李俊建等, 2016
阿林诺尔	三叠系粗粒钾长花岗岩	斑状细粒黑云母花岗岩	5 万吨 Mo @0.084%	SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 (229±2) Ma; 辉钼矿 Re-Os 等时线年龄 (227.0±3.1) Ma	刘翼飞等, 2010; 薛静等, 2010
翠宏山	下寒武统铅山组 and 上二叠统一下三叠统五道岭组	二长花岗岩	1 号矿体 8.2 万吨 Mo@0.115%, 9.5 万吨 W@0.17%, 28 万吨 Zn@2.75%, 8.7 万吨 Pb@2.7%	辉钼矿 Re-Os 等时线年龄 (198.9±3.7) Ma	郝宇杰等, 2013
大石河	新元古界浅变质岩系	似斑状花岗闪长岩	32 万吨 Mo@ 0.072%	辉钼矿 Re-Os 等时线年龄: (186.7±5.0) Ma	邵建波, 2015; 鞠楠等, 2012
鹿鸣	下寒武统铅山组和中奥陶统小金沟组	中细粒似斑状二长花岗岩	75 万吨 Mo@0.084%	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 (187.1±1.2) Ma; 辉钼矿 Re-Os 等时线年龄 (183.4±2.2) Ma	谭红艳等, 2012; 孙庆龙等, 2014
季德屯	二叠系杨家沟组板岩	似斑状二长花岗岩	35 万吨 Mo@ 0.087%	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 180 Ma; 辉钼矿 Re-Os 等时线年龄 (169±3) Ma; SIMS 锆石 U-Pb 年龄 (160.5±0.8) Ma	邵建波, 2015; 孟庆丰等, 2016; 卢志强等, 2016
福安堡	二叠系杨家沟组板岩、变质砂岩	似斑状二长花岗岩	24.8 万吨 Mo @ 0.066%	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 (172±1) Ma; 辉钼矿 Re-Os 等时线年龄 (166±1) Ma	刘万臻等, 2014; 李立兴等, 2009
迪彦钦阿木	下侏罗统查干诺尔组火山岩	斑状黑云母花岗岩	77.8 万吨 Mo@0.097%	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 156 Ma; 辉钼矿 Re-Os 等时线年龄 (156.2±4.2) Ma	Sun et al., 2014; 2015; Leng et al., 2015
岔路口	新元古界至寒武系斜长角闪岩、寒武系低级变质岩	花岗斑岩、石英斑岩和流纹斑岩	178 万吨 Mo@ 0.09%, 37 万吨 Pb+Zn@1.27%, 814t Ag@g2/t	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 147~148 Ma; 辉钼矿 Re-Os 等时线年龄 (146.96±0.79) Ma	聂凤军等, 2011; Li et al., 2014; Liu et al. 2014
兴阿	下侏罗统满克头鄂博组火山岩	二长花岗斑岩	10 万吨 Mo@0.132%, 10 万吨 Cu@0.418%	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 (129±1) Ma	张成等, 2013

注：兴蒙造山带及华北板块北缘产出的其他钼矿床(点)还有：淮苏吉花(298 Ma, 刘翼飞等, 2012b)、车户沟(245 Ma, 褚少雄等, 2010)、库里吐(245 Ma, Zeng et al., 2012)、老家沟(235 Ma, Zeng et al., 2012)、西沙德盖(226 Ma, 侯万荣等, 2010a)、霍吉河(181 Ma, 张森等, 2013)、张琳琳等(2014)、四方甸子(177 Ma, 张勇等, 2014)、刘生店(168 Ma, 王辉等, 2011)、碾子沟(154 Ma, 张作伦等, 2009)、哈什吐(149 Ma, 张可等, 2012, Zhai et al., 2014b)、半拉山(140 Ma, Zeng et al., 2012)、大草坪(139 Ma, 段焕春等, 2007, Jiang et al., 2014)、太平村(139 Ma, 孙金龙等, 2016)、乌日尼图(139 Ma, 杨增海等, 2016)、大庄科(138 Ma, 黄典豪等, 1996)、小东沟(136 Ma, 聂凤军等, 2007b)、红山子(132 Ma, Zeng et al., 2012)、敖伦花(132 Ma, Ma et al., 2013)、宜里(132 Ma, 黄凡等, 2014)、太平沟(130 Ma, 翟德高等, 2009)和含铜的太平川钼矿床(王召林等, 2014)。

荣等, 2010b)。

乌奴格吐山等斑岩型铜矿床是个例外, 形成于 (177.6 ± 4.5) Ma, 是蒙古-鄂霍次克洋向东南俯冲作用的结果, 而非古亚洲洋向西北俯冲及闭合的结果 (Chen et al., 2011)。古亚洲洋向南俯冲形成了白乃庙斑岩铜-金矿床 (445.0 ± 3.4) Ma, Li et al., 2012)。这些斑岩铜-钼-金矿床主要形成于古生代, 而钼矿化的形成肇始于古生代末期, 大规模成矿作用开始于三叠纪, 在侏罗纪至早白垩世期间达到矿化的高峰, 显示出斑岩铜-钼矿化在时代上具有明显不共生性特点。

不同类型斑岩型矿床 (尤其与其他热液矿床组成的区域矿床共生组合) 通常对应着不同的构造环境。如斑岩型铜-金矿床常发育于成熟度相对较低的岛弧, 斑岩型铜-钼矿床常发育于成熟度较高的陆缘弧区域, 高 F 型钼矿床通常形成于强烈的伸展环境 (White et al., 1981; Sillitoe, 2010)。兴蒙造山带及华北板块北缘斑岩铜-钼矿化形式的转换也指示着区域内构造环境的转换 (刘翼飞等, 2011a, 2012b; Chen et al., 2016)。研究显示, Laramide 造山作用使得美国西南部形成了大量的白垩纪—古近世 (> 55.8 Ma) 斑岩铜-钼矿床, 如 Santa Rita 矿床 (Sillitoe, 2010) 与 Laramide 造山作用有关的压性构造向伸展构造的转换在科罗拉多地区经历了大约 6 Ma ($43 \sim 37$ Ma), 这个时期开始发育铅、锌、银和金矿化, 但与强烈伸展作用有关的大规模钼矿化主要开始于 33 Ma (Chapin, 2012), 显示 Farallon 板块俯冲结束至伸展活动形成大规模钼矿化经历了大约 10 Ma, 也显示斑岩铜-钼矿化的转换经历了 23 Ma 以上。从整体上看, 兴蒙造山带在东经 120° 以西的地区有大量老于 200 Ma 的钼矿床, 在东经约 120° 以东的地区目前还没有发现老于 200 Ma 的钼矿床, 由西向东有逐渐年轻的趋势, 随后沿着大兴安岭主峰叠加了一次晚侏罗世至早白垩世的钼矿化事件, 并延伸至邻近的华北板块北缘区域, 但没有延伸至华北克拉通的中央, 南、北 2 个钼成矿带的成矿作用也均在白垩纪快速趋于减弱并熄灭 (图 4)。如果美国科罗拉多地区构造环境的转换及钼矿化的大规模形成与兴蒙造山带及华北板块北缘钼矿化的大规模形成可以类比, 那么兴蒙造山带及华北板块北缘三叠纪早期钼矿床的大量形成意味着古亚洲洋是由西向东逐渐闭合的, 洋壳的俯冲在兴蒙造山带的西段可能最终结束于二叠纪晚期 (约 255 Ma), 而在兴蒙造山

带的东段在三叠纪与侏罗纪之间 ($210 \sim 190$ Ma) 可能有一次洋壳闭合过程。

2.3 钼矿化的长期性和整体性

从目前的年代学数据来看, 兴蒙造山带及华北板块北缘内钼的区域成矿作用均具有长期性的特点。在北矿化带, 钼矿化开始形成于晚古生代, 如准苏吉花钼矿床 (约 298 Ma, 刘翼飞等, 2012b), 并与蒙古国南部伸展环境下形成的 Khan Bogd 碱性花岗岩基具有相似的形成时间 (约 290 Ma, Kovalenko et al., 2006)。如果从准苏吉花斑岩钼矿床的形成开始至乌兰德勒斑岩钼矿床的形成为止 (131 Ma, 陶继雄等, 2009), 兴蒙造山带及华北板块北缘的钼矿化成矿周期接近 170 Ma。南、北 2 条矿化带大规模钼矿化均开始于早、中三叠世, 其中北矿化带内最早形成的大型斑岩钼矿床是宝格达乌拉 (约 241 Ma, 刘勇等 2012; 李俊建等, 2016), 南钼化带内最早形成的大型斑岩钼矿床则是查干花 (含矿花岗岩侵位于 $253 \sim 254$ Ma, 刘翼飞等, 2012a)。从这 2 个矿床形成开始, 钼矿化沿着南、北 2 条矿化带大量形成。因此, 这 2 个矿床的形成可以代表兴蒙造山带及华北板块北缘大规模钼矿化作用的开始, 至乌兰德勒斑岩钼矿床的形成为止, 钼矿化成矿周期也长达 110 Ma。

对于兴蒙造山带及华北板块北缘分布广泛的钼矿床, 部分研究者倾向于将其划分为不同的成矿带和成矿期来进行探讨。如: 西拉木伦成矿带 (Zeng et al., 2011)、燕辽成矿带 (黄典豪等, 1996)、三叠纪成矿期 (Zeng et al., 2012) 及中生代成矿期 (毛景文等 2005 等)。同时, 也有研究也认为, 这种不同阶段的成矿作用的发生具有不同的成矿机制, 如: 俯冲增生构造体制结束后的大陆碰撞环境 (陈衍景等, 2012)、三叠纪碰撞后伸展环境 (Zhang et al., 2009)、三叠纪西伯利亚板块与华北板块之间的同碰撞环境 (Zeng et al., 2011; 2012)、侏罗纪碰撞后伸展环境 (毛景文等 2005)、侏罗纪期间由古太平洋西向俯冲构造形成的挤压环境 (Zeng et al., 2012; Han et al., 2009)、侏罗纪构造转换阶段 (Zhang et al., 2009)、白垩纪的岩石圈减薄事件 (毛景文等, 2005; Zhang et al., 2009) 以及鄂霍次克构造体制的产物 (Chen et al., 2016)。随着越来越多斑岩钼矿床被发现, 这些独立的钼成矿带逐渐连接成为一个连续的整体 (图 4), 总体上分布于受古亚洲洋向南北两侧俯冲所影响的兴蒙造山带及华北板块北缘, 在华北

板块北缘及兴蒙造山带的西部(大约东经 120° 以西),主要沿着造山带的外侧分布,在兴蒙造山带的东部(大约东经 120° 以东),主要围绕松辽盆地外侧分布,构成了南、北2个巨型钼成矿带,并在东西首尾相连。南矿化带和北矿化带总体的启动时间、峰期和逐渐熄灭的时间大体是一致的。三叠纪至早侏罗纪的钼矿化启动的时间,总体上由西向东逐渐迁移。沿着大兴安岭并向下延伸至华北板块北缘叠加了一期晚侏罗世至早白垩纪早期的钼矿化,但基本叠加于三叠纪至早侏罗世的钼成矿带内。笔者认为这些钼矿床是受古生代俯冲所塑造的岩浆源区的控制(后文讨论),应视为统一的整体(图4)。

兴蒙造山带内斑岩钼矿床的形成虽然具有一定的多期性,但从成矿年代学研究看是连续的。从查干花成矿岩体的就位时间253 Ma开始,以查干花、车户沟、查干花、宝格达乌拉、撒岱沟门、西沙德盖以及大苏计斑岩钼矿床相继形成,成矿时代的间隔总体上都不超过10 Ma,具有明显的连续性。这些矿床主要形成于早、中三叠世,可以认为是古亚洲洋封闭以后整体成矿期的一个次级成矿期,之后钼矿化作用进入相对静默阶段,直至翠宏山、大石河、鹿鸣、兰家沟、杨家杖子、季德屯、大黑山、福安堡、肖家营子、迪彦钦阿木、鸡冠山、曹四天、岔路口、小东沟及乌兰德勒等斑岩钼矿床在侏罗纪和白垩纪期间相继形成,成矿时间间隔最长不超过11 Ma,也具有明显的连续性(表2)。由于部分矿化已经被大量剥蚀,并考虑到将有更多的矿床被发现,届时兴蒙造山带华北板块北缘内钼矿化的这种连续性和整体性将会更加明显。

但笔者也并不否认这2个钼成矿带内成矿作用具有一定的多期性,而是认为这些钼矿床的形成具有共同的关键性因素,即是古生代古亚洲洋俯冲改造的源区,但是促使源区减压部分熔融的伸展环境可能存在强弱交替以及壳幔相互作用过程中热流值的变化,使得这2个成矿带内的钼矿化表现出一定的多期性。因为,俯冲结束后造山带内热流值与俯冲环境相比将显著降低(表现为岩浆活动的减弱),伸展环境的减弱将对壳幔活动过程中的热流值以及源区的部分熔融程度产生重要影响,进而使得成矿岩浆房内积累足够量的岩浆需要更长的时间。晚侏罗世至早白垩世再次加强的壳幔相互作用使得南、北2条钼成矿带深部源区的脱水熔融再次增强,从而形成了沿着大兴安岭主峰至华北板块北缘的钼矿

床。但如前所述,从整体上看,不论是三叠纪、侏罗纪还是白垩纪的钼矿化,均叠加发育于南、北2条钼成矿带内,并首尾相连构成了一条环状的钼成矿带,应视为统一的整体。

2.4 区域矿床的共生组合及区域成矿分带

区域矿床共生组合指的是具有相似成矿时代并形成于同一构造背景下的具有不同矿化形式的一组矿床,如斑岩矿床、矽卡岩矿床及岩浆热液脉状矿床,虽然他们之间确切的成因联系较难确立,但是这类矿床常常在区域内相伴产出,并常常相互构成找矿指示。古生代末期至中生代,兴蒙造山带及华北板块北缘多金属矿化发育,产出有大量与高分异花岗岩浆活动有关的钼、铅、锌、铜、银、锡、钨等多金属和贵金属矿化。从矿床的产出特征来看,钼矿化主要产出与古亚洲洋向北俯冲形成的增生带内以及古亚洲洋向南俯冲所影响的华北克拉通北缘地区,分别形成了南、北2条钼成矿带,并在东西首尾相连。2条钼成矿带中间夹着一条与高分异岩浆活动有关的锡-钨-钼多金属成矿带,构成了南、北、中“两钼一锡”3条成矿带的格局(图4)。兴蒙造山带及华北板块北缘这种成矿格局也说明,区域内至少存在2类不同成矿属性的高分异型成矿花岗岩,一类与钼多金属矿化有关,一类与锡多金属矿化有关。

南、北2个钼成矿带从矿床组合特征来看具有非常相似的特征,常常以斑岩(矽卡岩)型钼矿化为中心,外围伴生、共生热液脉状铅-锌-银-钨等矿化,在区域内构成斑岩钼和脉状铅-锌-银-钨的矿床组合特征,与美国科罗拉多地区斑岩钼矿床外围伴生的矿化具有非常相似的特点(White et al., 1981)。如北成矿带中的迪彦钦阿木斑岩钼矿化集中区的外围,产出有显著的矽卡岩型-脉状铅-锌矿化(Leng et al., 2015; Sun et al., 2015),在邻近的地区也发育有阿尔哈达脉状铅-锌-银矿床(张万益等, 2007)和沙麦热液脉型钨矿床(Jiang et al., 2016)等。宝格达乌拉斑岩钼矿床的外围也产出有明显的脉状钨矿化(刘勇等, 2012),岔路口斑岩钼矿床的上部也产出具有重要经济价值的脉状铅-锌-银矿化(刘翼飞等, 2011a; 金露英等, 2014)。南成矿带中也有类似的特征,如内蒙古查干花斑岩钼矿床在矿区的西南侧也伴生有脉状钨矿化,大苏计外围也产出有李清地脉状铅-锌-银矿化(祝新友等, 2005)。由于斑岩钼矿床的上部及其伴生的脉状矿床常赋存于同时代的火山岩内,因此,从火山岩的出露面积来看,南钼矿带的

剥蚀程度可能要比北钼矿带要强,也说明浅部脉状矿化的保存条件相对要比北成矿带的差。因此,南成矿带浅部及外围发现的脉状矿化相比北成矿带要少,但这也显示出在北成矿带内寻找巨型钼矿床的潜力还比较大。南、北2个钼成矿带具有相似的矿床共生组合,也进一步证实这2个矿化带为统一的整体。

南、北2个钼成矿带也有一些显著的差别。主要体现在2个方面:①地壳结构具有一定差别。北钼矿带是发育于古生代火山弧增生带,古老地壳不发育,而南成矿带则主要发育于受到古亚洲洋南向俯冲所影响的华北克拉通北缘地区,古老地壳发育;②南成矿带有一期二叠纪开始的金矿化事件,如内蒙古浩尧尔忽洞、毕力赫和图古日格金矿床,晚于古生代斑岩铜矿化时间并早于华北板块北缘三叠纪开始的大规模钼矿化事件(Li et al., 2012; Liu et al., 2016a; Ding et al., 2016; Yang et al., 2016),但目前在北成矿带还未见到显著的二叠纪金矿化事件的报道。大兴安岭北段、张广才岭、朝鲜半岛和俄罗斯远东地区产出有大量的热液金矿化,这些金矿化与南、北2条钼成矿带的形成时间和分布范围并非完全叠合,显示钼矿化和这些热液金矿化可能是彼此相互独立的成矿系统。

南、北2个钼成矿带之间,沿着造山带核心部位,为与高分异花岗岩有关的锡-钨-银多金属矿化带(刘翼飞等, 2014; 图4)。在该多金属矿化带中,矿床通常以斑岩锡-钨矿化(或次火山岩、矽卡岩型)为中心,逐渐过渡到铜-锌-铅-银脉状多金属矿化,典型的矿床如维拉斯托-拜仁达坝(刘翼飞等, 2014; Liu et al., 2016b)、敖瑙达巴(张德全, 1993)、毛登(刘玉强, 1996)、黄岗梁矽卡岩型矿床(周振华等, 2011; Zhai et al., 2014a)。近些年发现的一些超大型铅-锌-银矿床,如白音查干(聂凤军等, 2007a),其外围的深部也发现了大型斑岩锡多金属矿化。这些矿床常常出于大型高分异岩基的周边,与岩基冷却晚期分异的小岩体(株)有直接成因联系,如维拉斯托-拜仁达坝成矿系统与黄岗梁矿床出于北大山-黄岗梁高分异型花岗岩基的外围(周振华等, 2011; 刘翼飞等, 2014)。与该高分异型花岗岩相关的多金属成矿带,与南北两侧的钼成矿带的成矿年龄总体一致,开始于三叠纪,如白音诺尔矽卡岩型铅-锌矿(江思宏等, 2011),在侏罗纪—白垩纪达到峰期,如维拉斯托和拜仁达坝成矿系统(刘翼飞等, 2014)。

2.5 钼矿化的分类

根据国际上对钼矿化的分类,并基于兴蒙造山带及华北板块北缘钼矿床的矿化特征、成矿岩浆的地球化学属性,笔者认为兴蒙造山带及华北板块北缘的钼矿化与高F型具有较大的相似之处(刘翼飞等, 2011a; Pirajno et al., 2015),应归为高F型钼矿化,原因如下:

(1)兴蒙造山带内典型钼矿化常常与一定量的萤石共生,也有大量受断裂控制的萤石矿,与美国科罗拉多地区Rio Grande裂谷带断裂控制的萤石矿床具有非常相似的特征(White et al., 1981)。兴蒙造山带及华北板块北缘内典型的斑岩钼矿床,尤其在矿床的浅部和外侧均含有一定量的萤石,如岔路口、曹四天、查干花、迪彦钦阿木和鸡冠山等(曾庆栋等, 2009; 吴华英等, 2010; 陈伟军等, 2010; 刘翼飞等, 2011a; 2011b)。显示成矿热液中含有一定的F。也有研究显示,迪彦钦阿木矿床中磷灰石含有4%~5%的F,并被认为是成矿体系中含有较高F的证据(Sun et al., 2015)。同时,兴蒙造山带产出有大量的萤石矿床,如大兴安岭中南段的北大山岩基周边产出有数个萤石矿床,如达青萤石矿、内蒙古四子王旗北部苏莫查干敖包超大型萤石矿(许东青等, 2009),以及大兴安岭北段的海力敏和东方红萤石矿等。尽管萤石矿的年龄较难确定,但是围岩限定等方法显示,这些萤石矿常常与中生代的高分异型侵入体具有密切的时空联系,显示兴蒙造山带中生代高分异花岗岩浆中含有较高的F。

(2)兴蒙造山带及华北板块北缘的钼矿床的共生及伴生矿化与美国科罗拉多地区产出的高F型钼矿床具有类似之处(White et al., 1981)。科罗拉多地区的高F型钼矿化常常伴生有稀有金属矿化(如锡和钨),也常常与脉状铅-锌-银矿化共生(White et al., 1981; Ludington et al., 2009a)。兴蒙造山带及华北板块北缘内的典型钼矿床,尤其是剥蚀程度较低的钼矿床,如黑龙江岔路口、辽宁杨家杖子、吉林大黑山、内蒙古曹四天,其浅部或者外围常常产出有铅-锌-银矿化,构成典型的斑岩(矽卡岩)钼矿-浅成脉状铅-锌-银多金属成矿体系(刘晓林等, 2009; 刘翼飞等, 2011a; 金露英等, 2015; Li et al., 2014),也有部分斑岩钼矿床本身或外围伴生有钨-锡矿化,如内蒙古查干花、宝格达乌拉和黑龙江的翠宏山(刘勇等, 2012; 刘翼飞等, 2012a; 郝宇杰等, 2013)。

(3)兴蒙造山带及华北板块北缘的钼矿床与高

分异岩浆活动具有密切的成因联系。研究显示,结晶分异作用在高F型斑岩钼矿床的形成过程中具有关键性的作用,是成矿岩浆演化过程中钼元素大量富集的重要原因(Audétat, 2010)。兴蒙造山带及华北板块北缘典型斑岩钼矿床成矿岩浆也具有高分异的特征,研究显示,岔路口斑岩钼矿床成矿岩浆具有高分异I型花岗岩的特征,并经历了强烈的结晶分异作用(Li et al., 2014; Liu et al., 2015)。查干花斑岩钼矿床的成矿岩浆也经历了以斜长石和钾长石为主导的结晶分异作用(刘翼飞等, 2012a)。查干花、曹四天、迪彦钦阿木和岔路口斑岩钼矿床成(含)矿花岗岩类的 $w(\text{SiO}_2)$ 、 $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 及 D_1 分异指数的平均值分别为75.66%、7.70%和91.16,与科罗拉多地区的斑岩钼矿床成矿花岗岩相比非常相似(分别为74.93%、8.51%和92.65, White et al., 1981),但碱含量稍低,这也可能是兴蒙造山带及华北板块北缘内斑岩钼矿床的规模和钼品位比美国Rio Grande裂谷内斑岩钼矿床稍低的原因。需要指出的是,钼矿床的品位是多种因素制约的结果,并不是划分斑岩钼矿床类型的直接依据,例如,美国Rio Grande裂谷内裂谷期形成的Rito del Medio和Cañada Pinabete岩体含有大量的热液出溶UST结构,但与区域内其他同时代的高F型钼矿化相比,并没有发生明显的钼矿化(Audétat et al., 2003)。

(4) 兴蒙造山带及华北板块北缘中生代期间处于伸展构造环境,虽然驱动伸展环境的机制还有争议。研究显示,伸展环境是巨型钼成矿带形成的重要条件(White et al., 1981; Mutschler et al., 1981; Westra et al., 1981; Ludington et al., 2009a)。典型的高F型斑岩钼矿床常常产出岩石圈强烈伸展的环境,如美国西部的Rio Grande裂谷、挪威Oslo大陆裂谷及东格陵兰火山离散大陆边缘产出有典型的高F型斑岩钼矿床(Schönwandt et al., 1983; Brooks et al., 2004; Ludington et al., 2009a; Audétat, 2010; Chapin, 2012)。兴蒙造山带内中生代期间形成的大量高分异I型花岗岩、A型花岗岩以及双峰式火山岩显示,区域上处于伸展构造环境(Jahn et al., 2001; 林强等, 2003; Wu et al., 2002; 2003a; 2003b)。这种伸展环境与典型的高F型斑岩钼矿床的成矿环境有一定的差别,也有相似之处。不同之处在于:美国西部的Rio Grande裂谷、挪威Oslo裂谷及东格陵兰为典型的大陆裂谷,而非弧后(Olsen et al., 1987; Rowe et al., 2009; Schönwandt et al., 1983; Neumann et al.,

1992; Corfu et al., 2008; Brooks et al., 2004),但兴蒙造山带及华北板块北缘的伸展环境更有可能是造山后的伸展或者是亚洲东部伸展构造环境的一部分(Davis et al., 2001; Jahn et al., 2001; Meng et al., 2003; Pirajno et al., 2015)。虽然大陆裂谷环境下形成的成矿岩浆可能比造山后伸展环境中形成的岩浆具有更高的分异程度(这也可能是科罗拉多地区斑岩矿床比兴蒙造山带及华北板块北缘中的钼矿床具有更高品位的原因),但是它们之间存在显而易见的共性:① 不论是科罗拉多地区的Rio Grande裂谷还是挪威Oslo裂谷,亦或是东格陵兰火山离散大陆边缘,都是在早期的造山带的基础上发育的(Olsen et al., 1987; Rowe et al., 2009; Schönwandt et al., 1983; Neumann et al., 1992; Corfu et al., 2008; Brooks et al., 2004),这与兴蒙造山带及华北板块北缘造山后伸展环境有相似之处。而不在早期造山带基础上形成的裂谷,如东非大裂谷内则没有发现与美国Rio Grande裂谷一样的科罗拉多巨型钼成矿带;② 不论触发伸展环境的机制是大陆裂谷、还是造山后的伸展,均有助于高分异型岩浆活动的形成,并使得钼元素在岩浆中得到不同程度的富集,进而发生钼矿化。

可以看出,尽管与科罗拉多地区产出的典型的高F型钼矿床存在一些细微的差别,但是兴蒙造山带及华北板块北缘的钼矿床应归为高F型。

3 兴蒙造山带及华北板块北缘的钼矿化——问题与分析

尽管对兴蒙造山带及华北板块北缘的大量矿床已经开展了大量的工作,但基于南、北2条成矿带内钼矿化的特征、分布、研究进展,以及同国外典型高F型钼矿化的对比,还有一些问题需要进一步探讨,如:

(1) 兴蒙造山带及华北板块北缘巨型钼成矿带形成过程中的岩浆源区位于何处,为何能够持续有效提供巨量的成矿物质和水?

热液成矿作用过程是巨量成矿物质的富集过程,也是巨量热液的富集过程。研究认为碱性岩浆具有较低的含水量(如Lowenstern et al., 1993; Wu et al., 2002),但斑岩钼矿床的成矿岩浆一般为含水>5%的岩浆热液体系,同时,斑岩钼矿床的热液蚀变带的范围也显著大于斑岩体的体积,也显示成矿

作用过程中需要巨量的热液,因此,形成具有经济价值的斑岩型矿床至少需要 $40\sim 180\text{ km}^3$ 的成矿岩浆(White et al., 1981; Keith et al., 1986; Cline et al., 1991; Lowenstern, 1994; Shinohara et al., 1995; Klemm et al., 2008; Quadt et al., 2011; Audétat, 2010; 2015; Lerchbaumer et al., 2013; Mercer et al., 2015)。由此也可以认为,兴蒙造山带及华北板块北缘巨型钼成矿带的形成,同样是巨量成矿物质与热液同时富集的过程。对于缺乏同时代俯冲作用的巨型钼成矿带来说,也缺乏同时代的俯冲板块的脱水熔融过程。尽管有大量的研究认为伸展环境下的下地壳或者陆下岩石圈地幔构成了钼矿化岩浆的源区(Candela et al., 2005; Seedorf et al., 2005; Sinclair, 2007; Pettke et al., 2010; Audétat, 2010; Chapin, 2012),但是伸展环境并不是巨型钼成矿带的充分条件,如:东非大裂谷内就没有发现与美国 Rio Grande 裂谷一样的科罗拉多巨型钼成矿带。因此,为什么大陆下部岩石圈能够成为重要的热液矿床成矿源区还有较大争论。争论的关键在于在下地壳逐渐变质的过程中,金属会随着变质作用的进行而被释放的流体带走,从而造成麻粒岩相下地壳明显亏损大离子亲石元素及水(Clough et al., 1980; Cameron, 1989),因此,也有不少研究者认为下地壳是亏损成矿元素的(Cameron, 1989; Griffin et al., 2013),认为古老、缺水、难熔的下地壳及陆下岩石圈地幔是很难成为巨型钼成矿带的成矿源区。钼同位素的研究显示,华北板块北缘地区陆下岩石圈地幔在元古代期间已经经历了显著的脱熔体过程(Wu et al., 2003c; 2006),因此,兴蒙造山带及华北板块北缘巨型钼成矿带形成过程中的岩浆源区位于何处?又有何特殊之处?为何能够持续有效提供巨量的成矿物质和水?还有较大的探讨空间。

(2)是什么作用塑造了这样一种富集成矿元素和水的成矿源区,从而在兴蒙造山带及华北板块北缘形成了长期而且规模宏大的钼成矿带?

大地构造环境及其演化是矿床形成及其时空分布的第一位控制因素(Groves et al., 2007)。兴蒙造山带及华北板块北缘的大量斑岩钼矿床的形成作为区域内整个构造-岩浆演化格局的一部分,也必将受控于区域内的地球动力学演化过程。古生代向中生代转变时期,是兴蒙造山带构造演化的关键时期,逐渐由俯冲增生构造体制向碰撞造山及碰撞后的伸展构造环境演化,虽然转换的时间节点还存在巨大的

争议(Xiao et al., 2003; Meng, 2003; Xu et al., 2013; 2015)。有研究认为,兴蒙造山带及华北板块北缘的伸展构造环境是整个中国东部,甚至是亚洲东部燕山期构造热事件的一部分,是中生代太平洋俯冲板片俯冲作用的结果(Van der Voo et al., 2009; Wu et al., 2003b; Pirajno et al., 2015),或者是鄂霍茨克构造体制的结果(Chen et al., 2016)。然而(古)太平洋观点很难解释兴蒙造山带及华北板块北缘斑岩铜、钼矿化在时代上不共生性,很难解释为何太平洋的俯冲在中生代期间形成不了安第斯山陆缘弧和西南太平洋岛弧所观察到的与板块俯冲有关的斑岩铜矿床,却形成了大量的斑岩钼矿床,也很难解释为何新生代期间(古)太平洋板块持续向西俯冲的情况下形成了大量的中生代斑岩钼矿床,却鲜有新生代斑岩钼矿床的形成(甚至其他类型热液矿床)。由于兴蒙造山带及华北板块北缘钼成矿带主要于兴蒙造山带核心的两侧呈对称状产出,构成南、北2个钼成矿带,并首尾相连(古)太平洋观点也很难解释为何与太平洋俯冲带的展布方向不一致(图4)。这表明兴蒙造山带及华北板块北缘钼成矿带的形成有可能受控于太平洋俯冲构造之外的因素。近些年来,巨型钼成矿带成矿岩浆的源区逐步受到重视(如 Pettke et al., 2010; Audétat, 2010),也有研究者认为是克拉通边缘大陆岩石圈元古代及中生代的改造与金属再富集作用(侯增谦等, 2015)。因此,要厘清上述问题,厘清兴蒙造山带及华北板块北缘成矿源区的塑造因素,是元古代有限洋盆的俯冲还是成矿前古生代期古亚洲洋的俯冲,亦或是中生代钼矿化发生同时的太平洋俯冲,或是蒙古-鄂霍茨克构造体系向东南方向的俯冲,则显得尤为重要。

(3) 古老陆壳在钼矿床的形成过程中是否具有决定性作用?

科罗拉多钼成矿带和奥斯陆钼成矿带是世界范围内2条重要的钼成矿带。研究显示,这2条钼成矿带均发育于古老地壳上的裂谷带内,其中科罗拉多钼矿带发育于怀俄明克拉通南侧元古代 Yavapai 基底(18~16 亿年)之上的新生代 Rio Grande 大陆裂谷带内的东侧(Perry et al., 1987; Whitmeyer et al., 2007),奥斯陆钼成矿带则产出于波罗地海地盾(18~15 亿年)西南边缘的石炭纪—二叠纪裂谷带(Neumann et al., 1992; Ro et al., 1992; Bjørlykke et al., 1990; Sundvoll et al., 1990)。同样,中国华北板块北缘及南缘的钼成矿带也发育于华北克拉通

边缘(毛景文等, 2005; Mao et al., 2011; 陈衍景等, 2012; Jiang et al., 2014; Zeng et al., 2013; 侯增谦等, 2015)。世界范围内钼成矿带产出于克拉通边缘的现象也产生了一个疑问, 即: 古老岩石圈在钼矿床的形成过程中是否具有决定性的作用(Pettke et al., 2010)? 尽管在兴蒙造山带内可能存在古老微陆块(周新华等, 2009), 但目前研究显示, 北成矿带所在区域更有可能是叠加于西伯利亚板块南缘的古生代的增生地体之上, 而非克拉通边缘(Xiao et al., 2003; Windley et al., 2007; Xu et al., 2013; 2015)。钼矿化成(含)矿岩浆的 Sr-Nd 同位素研究结果也主要体现亏损地幔属性(Li et al., 2014; Sun et al., 2014)。这些现象显示北成矿带的形成过程中古老岩石圈的参与程度是非常有限的, 与南成矿带形成了鲜明的对比, 也与世界范围内其他主要钼成矿带形成了显著的对比, 也说明古老岩石圈在钼矿化形成过程中的作用需要考虑更多的因素。

兴蒙造山带及华北板块北缘 2 个钼成矿带最为显著的特征是二者发育于造山带核心的两侧, 构成了对称产出的形态, 并首尾相连。这种双钼成矿带的特征与其他巨型钼成矿带具有显著的不同, 如秦岭-大别地区的钼成矿带主要发育于华北板块南缘, 并没有发育于南侧的扬子板块之内, 形成了单条钼成矿带的特征(Mao et al., 2011)。这种差异与钼成矿带形成前的构造演化格局是吻合的, 即: 兴蒙造山带及华北板块北缘内的双钼矿带与古生代期间古亚洲洋向南北两侧俯冲的特征一致(Xiao et al., 2003; Windley et al., 2007; Xu et al., 2013, 2015), 而华北板块南缘的秦岭-大别钼成矿带与古生代扬子板块向北的单向俯冲特征一致(Liu et al., 1989; Li, 1994; Hacker et al., 1998)。这也暗示巨型钼成矿带的形成与成矿前的俯冲构造及其极性可能具有一定的联系。

研究显示, 科罗拉多钼成矿带和奥斯陆钼成矿带在成矿前也经历了显著的构造叠加。Rio Grande 裂谷(33 Ma 开始) 发育前经历了与 Farallon 板块俯冲有关的 Laramide 造山作用(80~40 Ma), Oslo 裂谷形成之前也经历了多期造山作用, 包括前寒武纪—早寒武纪 Sveconorwegian 造山作用(12~11 亿年), 以及之后的加里东造山作用, 并最终发育于华里西造山带(Corfu et al., 2008; Ro et al., 1992; Bjørlykke et al., 1990; Sundvoll et al., 1990)。因此, 还需更多的工作来厘清古老地壳在巨型钼成矿

带形成过程中是否具有关键性的作用, 以及成矿前的构造叠加对随后的巨型钼成矿带的形成具有多大的贡献。

4 兴蒙造山带及华北板块北缘的钼矿化——早期俯冲改造的岩浆源区对成矿的贡献?

总体上可把上述问题归纳为兴蒙造山带及华北板块北缘 2 条钼成矿带富含成矿物质(金属、水和配体, 如硫、氯和氟等) 的成矿源区的塑造过程, 成矿岩浆如何从源区形成, 成矿物质如何富集至成矿岩浆以及成矿岩浆的演化、就位和控制机制等。前人对上述问题进行了大量的研究。以下主要以南矿带的曹四天、查干花和北矿带的岔路口为典型矿床, 对南、北 2 个钼成矿带的成矿作用进行对比, 同时也与 2 个成矿带内斑岩铜矿床的成矿岩石、碱性岩、陆下岩石圈地幔橄榄岩和新生代的碱性玄武岩进行对比, 主要从成矿源区的塑造过程来初步探讨上一节提出的一些问题以及南、北 2 个钼成矿带的成因模型。

4.1 脱水熔融是成矿岩浆得以形成的本质

(1) 斑岩铜、钼矿床成矿岩浆的差异

大量的岩石学及地球化学研究表明, 兴蒙造山带及华北板块北缘斑岩铜、钼矿化对应着不同属性的成矿岩浆。斑岩型铜-钼-金矿床矿床, 如多宝山、白乃庙和欧玉陶勒盖等斑岩铜多金属矿床, 与成矿有关的岩石主要为英云闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、花岗闪长岩及石英二长岩。主量元素具有中等偏高的硅含量、较高的碱含量, 准铝至过铝质、钙碱性至高钾钙碱性, 微量元素上具有 LREE 富集、HREE 亏损, LILE 富集、HSFE 亏损的特征, 同位素则显示出强烈壳幔相互作用的证据, 具有明显弧岩浆作用的特点。总体上, 具有弧岩浆的地球化学特征(图 5、图 6a; Wainwright et al., 2011; Li et al., 2012; Zeng et al., 2014)。而斑岩型钼矿床, 相比斑岩型铜-钼-金矿床, 成矿岩体的岩性一般为二长花岗岩、钾长花岗岩和流纹岩, 部分岩体具有高分异 I 型花岗岩的部分特征。高硅、高碱、准铝至过铝质, 为高钾钙碱性至钾玄岩序列岩浆。亏损高场强元素, 富集大离子亲石元素(图 5、图 6a; 陈志广等, 2008; 覃锋等, 2009; 马星华等, 2009; 骆文娟等, 2010; 刘翼飞等, 2012a; Ma et al., 2013; Jiang et al., 2014; Li et al., 2014; Liu et al., 2015)。

兴蒙造山带及华北板块北缘斑岩铜、钼矿化岩浆属性具有明显的差异,在岩浆的分异程度上尤为明显。从主量元素地球化学的对比可以发现,兴蒙造山带及华北板块北缘斑岩钼矿床岩浆演化程度明显要高于斑岩铜矿床。斑岩钼矿床的 $w(\text{SiO}_2)$ 明显高于斑岩铜矿床。大部分斑岩钼矿床的 $w(\text{K}_2\text{O})$ 高于4%,而斑岩铜矿床大部分低于4%。在硅-钾图解(图5)中二者重叠的区间较少,斑岩铜矿床主要为钙碱性至高钾钙碱性系列,而斑岩钼矿床则主要为高钾钙碱性至钾玄岩系列。微量元素的分布特征也显示与斑岩钼矿化有关的含矿中酸性岩浆具有更高的演化程度,如斑岩钼矿含矿岩浆 Ba、Sr、P 和 Ti 的含量明显低于斑岩铜矿床,显示出这些元素在结晶分异过程中分离程度更高,而 Rb、K、La 等元素则明显高于斑岩铜矿床,显示出较强不相容元素在结晶分异过程中富集程度更高。

高 F 型钼矿床含有较低的铜,成矿岩浆强烈的分异作用可能是其中的一项重要原因。Cu 在成矿作用过程中是一种相容元素(Candela et al., 1986),

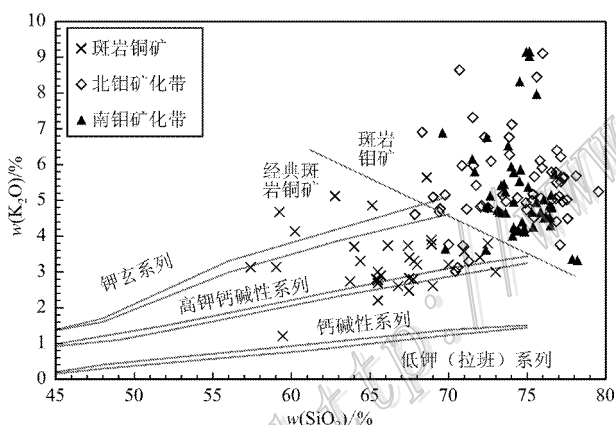


图5 兴蒙造山带及华北板块北缘代表性斑岩铜、钼矿床含矿中酸性岩类硅-钾图解

代表性矿床为欧玉陶勒盖铜矿集区和多宝山铜矿床,岔路口、迪彦钦阿木、查干花、曹四天及兰家沟钼矿床,数据引自代军治等, 2008; Wainwright et al., 2011; 刘翼飞等, 2012a; Dolgoplova et al., 2013; Li et al., 2014; Zeng et al., 2014; Sun et al. 2014; Liu et al., 2015 及刘翼飞未发表数据

Fig. 5 K_2O versus SiO_2 plot for porphyry Cu and Mo deposits occurring in Xing'an-Mongolia orogen and its adjacent areas representative porphyry Cu deposits include Ouyu Tolgoi and Duobaoshan, representative porphyry Mo deposits include Chaganhua Chalukou and Caosiyao, data are from Wainwright et al., 2011; Liu et al., 2012b; Dolgoplova et al., 2013; Li et al., 2014; Zeng et al., 2014; Sun et al. 2014; Liu et al., 2015 and the authors' unpublished data

而 Mo 在成矿作用过程中常常表现为不相容元素 (Lowenstern et al., 1993; Audétat et al., 2010; 2011, 2015; Lerchbaumer et al., 2013)。包裹体成分研究显示,成矿岩浆的结晶分异是 Mo 大量富集的重要机制, Audétat (2010) 在一个研究实例中发现,随着岩浆从基性碱性岩浆($w(\text{SiO}_2)$ 为 50%) 演化至流纹质岩浆($w(\text{SiO}_2)$ 为 75%) 的过程中,包裹体中 $w(\text{Mo})$ 从 4×10^{-6} 富集到 12×10^{-6} ,并在流体出溶后降低到 5×10^{-6} 。也有研究显示,部分钼成矿系统中,包裹体成分的中间演化阶段有令人意外高的铜含量,但铜最终没有发生显著的矿化,而是发生了明显的钼矿化(Lerchbaumer et al., 2013; Mercer et al., 2015)。因此,钼、铜在成矿岩浆演化过程中的强烈分异(钼得到富集而铜却被分离)可能是伸展环境下高分异岩浆含有较高钼却不含铜的重要原因之一($w(\text{SiO}_2)$ 高于 74%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 高于 4%, 图 5)。

(2) 斑岩铜、钼矿床成矿岩浆的共性

兴蒙造山带及华北板块北缘斑岩铜、钼矿化成矿岩浆虽然具有明显的差别,但也有共性。数据显示,斑岩铜、钼矿化成矿岩石的微量元素原始地幔配分型式总体上是非常一致的,尤其具有明显的 Nb、Ta 和 Ti 的负异常,以及强烈的 Pb 正异常(图 6a)。显示出斑岩铜、钼矿化岩浆均具有流体交代的特征,继承了部分弧岩浆作用的特征,可能是古生代期间弧岩浆作用形成的源区再次部分熔融的结果,或者受到了大陆地壳的混染(刘翼飞等, 2012a)。从岩石学及主微量元素地球化学特征来看,南、北 2 个钼成矿带内典型钼矿床成(含)矿花岗岩也具有非常相似的特征(图 5 和图 6a)。

在经典的板块俯冲环境斑岩铜矿床成矿模型中,大洋板块在俯冲过程中的脱水对矿床的形成具有决定性作用(Brandon et al., 1996; Carroll et al., 1985; Richards, 2003; Candela et al., 2005)。研究显示,高场强元素主要赋存于金红石等矿物中,大离子亲石元素由于亲流体的属性,在脱水熔融过程中大量进入流体相或者熔体相,但是这个过程含含金红石等矿物的榴辉岩残留造成了显著的高场强元素的亏损。也就是说,流体是造成 Nb、Ta 亏损的关键 (Green et al., 1987; Zack et al., 2002; Klemme et al., 2005; Baier et al., 2008; Gao et al., 2007; Goss et al., 2009)。因此,高场强元素的亏损是脱水熔融的显著标志。尽管非俯冲环境岩浆中含水量可能比俯冲环境岩浆中含水量要低,但斑岩钼矿床的

成矿岩浆房也富水,其含水量在晚期甚至能达到 10%(Lowenstern , 1994 ; Shinohara et al. , 1995 ; Keith et al. , 1988 ; Klemm et al. , 2008 ; Audétat , 2015)。从兴蒙造山带典型斑岩铜、钼矿化成(含)矿岩浆地幔不相容元素蛛网图特征可以看出,二者的岩浆分布特征非常相似,尤其在亏损高场强元素上,二者是非常一致的,南、北 2 个钼成矿带的成(含)矿岩浆差别不显著(图 6a),显示斑岩钼矿床成矿岩浆的形成也与斑岩铜矿一样,脱水熔融在其中扮演了非常重要的角色,甚至有不可或缺的作用。

研究显示,美国科罗拉多地区造山后(post-Laramide)的 Rio Grande 裂谷岩浆常显示出弧岩浆活动的地球化学特征。对于这种现象一直存在 Farallon 板块俯冲交代改造与地壳混染 2 种不同的观点(Dungan et al. , 1986 ; Gibson et al. , 1993 ; McMillan , 1998 ; Lee , 2005 ; Wolff et al. , 2005),更多的新证据更倾向于板块俯冲改造的观点,并认为 Farallon 板块俯冲过程中的脱水过程交代改造了科罗拉多地区陆下岩石圈地幔(Lee , 2005 ; Rowe et al. , 2009)。而科罗拉多钼成矿带的形成正是与 Rio Grande 裂谷型岩浆活动有关(Chapin , 2012),这也进一步证实了脱水熔融在钼成矿带形成过程的重要作用。

最近的研究认为,下地壳和大陆下部岩石圈地幔有可能是成矿岩浆和金属来源(Candela et al. , 2005 ; Seedorf et al. , 2005 ; Sinclair , 2007 ; Pettke et al. , 2010 ; Audétat , 2010 ; Chapin , 2012)。华北板块北缘还存在着元古代置换后的古老陆下岩石圈地幔,汉诺坝玄武岩地幔包体被认为是元古代陆下岩石圈地幔的代表(高山等,2003; Wu et al. , 2003c ;夏琼霞等,2004),其微量元素含量总体上低于原始地幔值(夏琼霞等,2004),Nb、Ta 和 Ti 等元素不亏损, Pb 正异常也不明显,与兴蒙造山带及华北板块北缘的斑岩铜、钼矿化成(含)矿岩石的微量元素配分型式区别显著(图 6a、6c)。同时,携带陆下岩石圈地幔岩石至地表的汉诺坝玄武岩被认为源于华北板块陆下的软流圈,受到陆壳的混染非常有限,具有洋岛玄武岩的地球化学特征,不具有明显的 Nb 和 Ta 正异常(Song et al. , 1990 , Zhi et al. , 1990),也与兴蒙造山带及华北板块北缘斑岩铜、钼矿化成(含)矿岩石的微量元素配分型式差别显著(图 6a、6d)。通过上述兴蒙造山带及华北板块北缘斑岩铜、钼矿床成

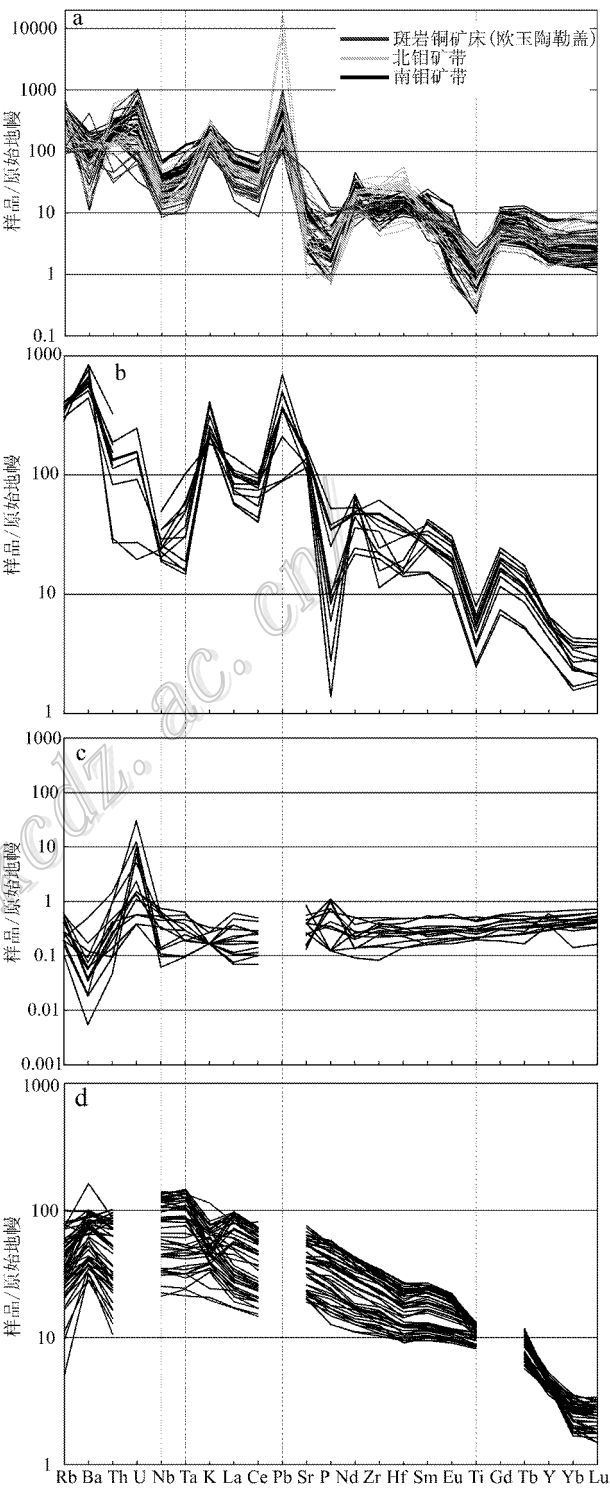


图 6 微量元素蛛网图解(原始地幔标准化数据为 Sun et al. , 1989)
a. 兴蒙造山带及华北板块北缘代表性斑岩铜、钼矿床含矿中酸性岩类(代表性矿床为欧玉陶勒盖铜矿床,岔路口、查干花及曹四天斑岩钼矿床,数据引自 Wainwright et al , 2011 ;刘翼飞等,2012a ; Dolgoplova et al. , 2013 及刘翼飞为发表数据); b. 华北板块北缘三叠纪碱性岩(数据引自包头东岩体,牛晓霞等,2016);

c. 华北板块北缘古老陆下岩石圈地幔橄榄岩(数据引自汉诺坝玄武岩包体 夏琼霞等, 2004); d. 华北板块北缘下的新生代软流圈地幔玄武岩(数据引自汉诺坝玄武岩 Zhi et al., 1990)

Fig. 6 Primitive mantle (PM) normalized spidergrams
(after Sun et al., 1989)

a. ore-forming/bearing granite of porphyry Cu and Mo deposits occurring in Xing'an-Mongolia orogen and adjacent areas (representative porphyry Cu deposits include Ouyu Tolgoi and Duobaoshan, representative porphyry Mo deposits include Chaganhua, Chalukou and Caosiyao, data are from Wainwright et al., 2011; Liu et al., 2012b; Dolgoplova et al., 2013 and the authors' unpublished data); b. typical Triassic alkaline rocks from Baotoudong (after Niu et al., 2016); c. peridotite xenoliths from Hannuoba (SCLM, after Xia et al., 2004); d. Cenozoic continental alkalic and tholeiitic basalt from Hannuoba (asthenospheric mantle, after Zhi et al., 1990)

(含)矿岩石与华北板块陆下岩石圈地幔橄榄岩、软流圈地幔玄武岩以及三叠纪碱性岩的微量元素特征的对比研究,软流圈上涌并携带陆下岩石圈地幔至地壳浅部的过程缺乏斑岩型矿化岩浆活动所需的脱水熔融过程,不能形成富含水的成矿岩浆,因此不能直接形成兴蒙造山带及华北板块北缘的斑岩铜、钼矿化所需要的成矿岩浆。值得注意的是,斑岩铜、钼矿化成(含)矿岩石的特征与三叠纪华北板块北缘,尤其是靠近造山带部位的碱性岩浆活动具有非常一致的特点(图 6b,如阎国翰等, 2001;任康绪等, 2004;汤艳杰等, 2014;牛晓露等, 2016)。对华北北缘三叠纪碱性岩元素和同位素的研究显示,其形成过程可能与俯冲洋片脱水交代的下覆岩石圈地幔的熔融作用有关(汤艳杰等, 2014;牛晓露等, 2016)。如前所述,兴蒙造山带及华北板块北缘南钼成矿带内钼矿床大规模形成正是古生代末期至三叠纪,这种脱水熔融作用形成的碱性岩与钼矿化在时空上的耦合也显示二者的形成可能有共同的因素。

4.2 早期的洋片俯冲改造是成矿岩浆源区得以形成的关键

研究显示,斑岩钼矿化的形成与高分异岩浆的演化有直接的联系(Audétat et al., 2011; Lerchbaumer et al., 2013; Audétat, 2010; 2015)。但是,高分异型岩石分布范围比较广泛,晚期能够形成钼矿化的高分异型岩浆系统却相对较少,如在大兴安岭地区发育大量的高分异型花岗岩(Wu et al., 2003a; 2003b),但到目前为止,在大兴安岭中南段还没有发现大量的规模型斑岩钼矿床,却分布有大量与高分异型花岗岩有关的斑岩锡多金属及相关的脉

状矿化(图 4,刘翼飞等, 2014; Liu et al., 2016b)。其他地方分布的一些成矿高分异花岗岩也与斑岩型钼矿化无关,如广西个旧地区(毛景文等, 2008)。因此,成矿源区的属性及塑造过程同样非常重要,可能是制约成矿作用结果的关键因素之一(Pettke et al., 2010)。长期以来,钼被认为来源于大陆地壳,尤其是下地壳(Simmons et al., 1978; Candela et al., 2005; Seedorf et al., 2005; Stein, 2006; Sinclair, 2007; Chapin, 2012)。由于世界范围内的钼成矿带主要集中产出美国科罗拉多、挪威奥斯陆以及华北板块南、北缘等古老的大陆上,因此钼元素被认为可能来源于古老的下地壳或者大陆下部岩石圈地幔(Pettke et al., 2010; 侯增谦等, 2015)。最新的研究显示,高 F 型斑岩钼矿床与伸展环境下基性碱性岩浆活动有关,其源区更有可能是陆下岩石圈地幔(Pettke et al., 2010; Audétat, 2010; 2015)。

从成矿岩浆 Sr-Nd 同位素组成特征来看,北钼成矿带斑岩钼成矿岩浆与欧玉陶勒盖成矿岩石的同位素特征有共性,也有差别。共性在于,二者大都具有正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,显示二者的源区从地幔分异出来的时间较短。二者也有一些细微的差别,主要表现在 Sr-Nd 同位素的演化趋势上。欧玉陶勒盖初始 Sr-Nd 同位素组成主要分布于地幔趋势线上,具有亏损地幔源区的特征,受到高 Rb/Sr 比值浅部岩石混染程度较小。但是对单个的斑岩钼矿床来说,初始 Sr-Nd 同位素组成在图解上主要呈横向的“一”字排列,成矿岩浆初始 Nd 范围变化不大,显示岩浆来源于初始 Sm/Nd 比值较为均一的源区,或者岩浆演化过程没有经历显著的 Sm-Nd 分异,亦或者不同端员混合的 Sm/Nd 比值在岩石圈垂向上变化较小,但是初始 Sr 同位素组成的变化范围较大,显示成矿岩浆形成过程中涉及到初始 Rb/Sr 比值差异较大的不同端员,其中有一个端员是经历了 Rb/Sr 强烈分异、Rb/Sr 比值非常低的源区,可能位于地幔演化线的左侧,另外一个端员具相对较高的 Rb/Sr 比值,为分异程度较高的上部地壳(图 7),但是由于兴蒙岩石圈具有新生的特点,因此放射性成因积累的 Sr 依旧较低。这 2 种 Sr-Nd 同位素特征的细微差异,可能反映了岩浆源区的差异,欧玉陶勒盖的岩浆源区可能主要来源于亏损地幔,是洋内弧环境板块俯冲作用下楔型地幔来源的产物,没有受到成熟的地壳的混染(Wainwright et al., 2011; Dolgoplova et al., 2013)。而北成矿带成矿岩浆源区有一个端员来源

于经历了大离子亲石元素抽取后的源区,这种 Sr-Nd 同位素特征与大兴安岭地区典型的花岗岩 Sr-Nd 同位素组成非常类似(图 7),这类花岗岩可能属于高分异 I 型和 A 型花岗岩,其形成可能是显生宙地幔地垫玄武质岩浆和下地壳混合的结果(Jahn et al., 2000; Wu et al., 2000; 2003b)。

如前所述,兴蒙造山带及华北板块北缘南、北 2 个钼成矿带除了南矿化带上叠加了显著的金矿化外,无论从矿化特征,矿床共生组合特征,矿化的起止时间,还是成矿岩浆的元素地球化学特征上,均很相似,很难区分 2 个矿化带内斑岩钼成矿作用之间的差别。但从成(含)矿斑岩的 Sr-Nd 同位素的特征来看,二者差别显著。北矿带斑岩钼成矿岩浆总体具有正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,而南矿带斑岩钼成矿岩浆则具有明显的负 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,显示古老岩石圈参与程度的差异,北矿带的成矿岩浆是地幔新生物质经历了较短同位素积累后再次部分熔融的产物,而南矿带成矿岩浆则是古老岩石圈经历了较长同位素积累后再次部分熔融的产物。虽然二者古老物质参与程度具有很大的差别,但是南、北 2 个钼矿带成矿岩浆也有一些共同点,主要表现为:从 2 个钼矿带的角度,钼成矿岩石在 Sr-Nd 图解上有 3 端员混合的特征,但从单个矿床看,初始 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化均比较小,初始 Sr 同位素组成变化却比较大,显示出两端员混合的特征,如北矿带岔路口和迪彦钦阿木矿床的成矿岩浆初始 Sr 同位素组成一般变化于 0.703~0.708 之间,南矿带查干花和曹四天 2 个典型斑岩钼矿床的成矿岩浆初始 Sr 同位素组成变化较大,处于 0.703~0.766 之间,在 Sr-Nd 同位素图解上呈横向的“一”字排列,低 Rb/Sr 比值端员均位于地幔演化线的左侧,并受到高 Rb/Sr 比值端员的混染(图 7, Sun et al., 2014; 2015; Li et al., 2014; 刘翼飞未发表数据)。研究显示,地壳浅部岩石往往具有较高的 Rb/Sr 比值,如大兴安岭地区产出的高分异型花岗岩,可能成为钼矿化成矿岩浆浅部的被动混染源,岩浆侵位的主要动力可能来自于深部,如地幔底垫的玄武岩和下部地壳(Jahn et al., 2000; Wu et al., 2000; 2003a; 2003b)。查干花斑岩成矿(含矿)岩体中元古宙的继承锆石,表明成矿岩浆明显受到地壳浅部岩石的混染,构成了高 Rb/Sr 比值端员。由于地壳浅部岩石 Rb/Sr 比值变化较大,南成矿带位于华北克拉通北缘,古老岩石由于经历了长时间的同位素演化,其初始 Sr 同位素组成具有较大的变化范围,

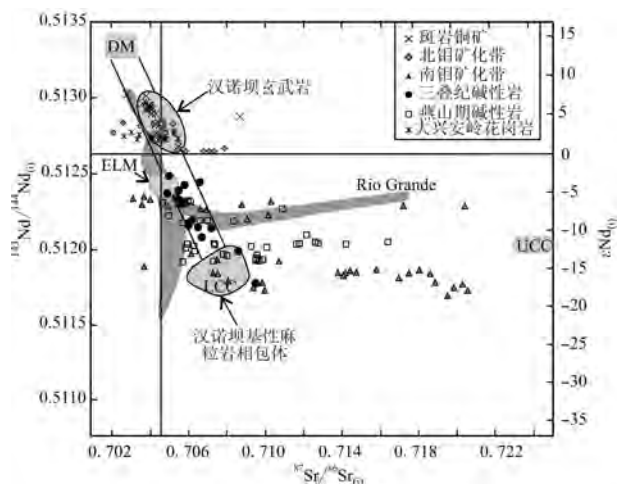


图 7 兴蒙造山带及华北板块北缘不同端员来源岩石与斑岩铜、钼矿床成矿岩石 Sr-Nd 同位素组成对比图解
华北板块陆下富集岩石圈地幔(ELM)、下陆壳(LCC)及上陆壳(UCC)端员组成引自 Zhou et al., 2002 和 Yang et al., 2008; 汉诺坝玄武岩(OIB 洋岛玄武岩特征), 引自 Song et al., 1990; 三叠纪碱性岩引自阎国翰等, 2000 和牛晓露等, 2016; 燕山期碱性岩数据引自 Yang et al., 2008; 大兴安岭中生代花岗岩数据引自 Wu et al., 2003a; 2003b; Rio Grande 数据引自 Williams, 1984, 代表性矿床成矿岩石(欧玉陶勒盖铜矿床, 岔路口、查干花及曹四天斑岩钼矿床)数据引自 Wainwright et al., 2011; 刘翼飞等, 2012; Dolgopolova et al., 2013 及刘翼飞未发表数据, DM 为亏损地幔端员

Fig. 7 Sr-Nd isotope correlation plot for ore-forming/bearing rocks of porphyry Cu and Mo deposits in Xing'an-Mongolia orogen and its adjacent areas.

The enriched lithospheric mantle (ELM), lower continental crust (LCC) and upper continental crust (UCC) components of North China Craton are from Zhou et al., 2002 and Yang et al., 2008; the data for Hannuoba basalts, Triassic, Yanshanian alkaline rocks, Mesozoic granite in the Da Hinggan Mountains and Rio Grande magmatism are from Williams, 1984; Song et al., 1990; Yan et al., 2000; Wu et al., 2003a; 2003b; Yang et al., 2008 and Niu et al., 2016; data of representative ore deposits are from Wainwright et al., 2011; Liu et al., 2012; Dolgopolova et al., 2013; and the authors' unpublished data

北成矿带位于显生宙的新生地壳之内,南成矿带浅部被动混染端员的初始 Sr 组成很明显会高于北成矿带,因此,高初始 Sr 比值的浅部混染端员可能不能够代表成矿岩石的真正来源,而具有深部来源特征的低 Rb/Sr 比值可能更能代表南、北 2 个钼成矿带成矿岩浆真正的主动性源区端员。由于南矿化带经历了克拉通化以来长时间的放射性成因 Sr 同位素的积累,北矿化带具有新生特点,这也反映了大规模钼矿化发生以前,成矿岩浆的主动性源区的 Rb/Sr 比值均非常低且较为接近,使得放射性成因 Sr 难以积累,这种源区可能均经历了大离子亲石元素强

烈抽取,很可能有一部分源区位于地幔演化线的左侧。

由于南、北2个钼成矿带主要形成于三叠纪至侏罗纪及白垩纪期间,放射性 Sr-Nd 同位素积累的时间是大概一致的,而且单个钼矿床初始 Nd 同位素变化相对有限,单个钼矿床的 Sm/Nd 比值较为均一。研究显示,欧玉陶勒盖成矿岩浆的 Sm/Nd 比值平均为 0.23,代表华北板块下部软流圈地幔的汉诺坝玄武岩的 Sm/Nd 比值平均为 0.23,这两者均被认为来源于软流圈地幔(Zhi et al., 1990; Wainwright et al., 2011; Dolgoplova et al., 2013)。代表华北板块古老陆下岩石圈地幔的汉诺坝玄武岩中的橄榄岩包体的 Sm/Nd 平均值为 0.4(夏琼霞等, 2004),代表华北板块北缘下部古老下地壳的基性麻粒岩包体的 Sm/Nd 平均值为 0.25(Zhou et al., 2002),代表华北板块北缘下部改造后的陆下富集地幔的三叠纪包头东碱性岩体的 Sm/Nd 平均值为 0.2,比古老陆下岩石圈地幔更为富集(夏琼霞等, 2004; 牛晓露等, 2016),大兴安岭地区高分异产出的 I 型花岗岩的 Sm/Nd 比值平均为 0.16(Wu et al., 2003a; 2003b),南、北2个钼成矿带成矿岩浆的 Sm/Nd 比值平均分别为 0.19 和 0.17(Li et al., 2014; Sun et al., 2014; Liu et al., 2015 及刘翼飞未发表数据)。这些数据显示,大部分斑岩钼矿床岩浆演化过程中没有经历显著的 Sm-Nd 分异,或者不同混染端员 Sm/Nd 的比值相差并不是太大,使得南、北2个钼成矿带成矿岩浆的 Sm/Nd 平均比值非常相近,初始 Nd 同位素的差异,更可能反映了钼成矿带成矿源区塑造之前初始 Nd 同位素组成的不同,而不是 Sm/Nd 比值的差异。三叠纪碱性岩及南矿化带钼成矿岩浆的 Sm/Nd 比值比古老陆下岩石圈地幔的 Sm/Nd 比值更低,也显示其源区是古老陆下岩石圈地幔经过大离子亲石元素再富集以后的产物。上述数据的对比及国际上的最新研究表明,虽然南、北2个钼成矿带成矿岩浆的源区初始 Nd 同位素差异巨大,但它们的 Sm/Nd 平均比值与华北板块北缘三叠纪碱性岩非常类似,暗示它们在岩石圈内具有大致相同的位置,可能分别来源于被改造的陆下岩石圈地幔和新生的陆下岩石圈地幔,也显示古老克拉通并不是巨型钼矿化形成的必要条件。

4.3 叠合成矿模型

通过上述对比性研究和探讨,结合国内外最新的研究进展,笔者认为兴蒙造山带及华北板块北缘

产出的巨型钼矿化,其成矿岩浆是脱水熔融的产物,其源区与古老陆下岩石圈地幔相比经历了成矿元素、水、大离子亲石元素等的明显(再)富集过程。由于南、北2个钼成矿带成矿事件从古生代末期开始,大规模发育于兴蒙造山带及华北板块北缘的西段,至侏罗纪逐渐向东段迁移,并在白垩纪末期趋于减弱和停止(包括其他热液矿床),与区域内古生代俯冲作用有关的斑岩铜矿化相比也有明显的时代不共生性和顺序演化性。同时,南、北2个钼成矿带具有明显的连续性和整体性,矿化的特点和矿床的共生组合特征也具有明显的共性。因此,笔者认为兴蒙造山带及华北板块北缘南、北2个钼成矿带具有共同的成因,是古生代古亚洲洋俯冲脱水熔融塑造的富含成矿元素、水和大离子亲石元素等的成矿源区,在后期强烈伸展环境下脱水熔融形成高分异型岩浆,就位到浅部成矿。主要涉及到3个环节,水在其中每个环节都起着非常重要的作用:①早期(古生代)俯冲过程洋片的脱水交代陆下岩石圈地幔,形成富水和富亲流体成矿元素的源区;②后期(中生代)富水源区的低程度脱水熔融,形成富水熔体,亲流体的成矿元素也得以大量进入熔体相;③富水熔体在水饱和状态的结晶分异并有流体出溶,使得成矿物质能够大量分配至热液,本文主要探讨第一个环节,主要涉及到以下几个方面:

(1) 岩浆源区金属、水和大离子亲石元素的(再)富集机制

从兴蒙造山带华北板块北缘内南、北2个钼成矿带的地质特征可以看出,总体上斑岩铜钼矿化在成矿时代上具有的不共生特点。尽管斑岩铜钼矿化成矿过程可能存在显著的差异,但二者的形成均伴随着规模巨大的热液蚀变带,另外从二者成矿岩浆的地球化学特征的对比也可以看出(图6),脱水熔融是二者得以形成的关键之一。对于南矿化带来说,其陆下的岩石圈地幔被认为具有元古代的钼同位素模式年龄,是元古代构造事件改造后的结果(高山等, 2003; Wu et al., 2003c; 夏琼霞等, 2004),但从元素地球化学的特征来看,元古代经历过长时间脱水熔融的古老陆下岩石圈是不足以在古生代末期至中生代期间形成典型的斑岩钼成矿岩浆。古亚洲洋俯冲构造体制结束后,华北板块北缘开始大量形成一套与伸展环境有关的深部来源(SCLM 或者 LCC)碱性岩,其地球化学也具有显著的脱水熔融特征(图6)。因此,元古代至三叠纪之间的构造事件,才是导

致华北板块陆下岩石圈地幔和下地壳再次被水化的关键,这个构造事件正好与古亚洲洋洋片的俯冲相吻合。由于北矿化带产出具有新生特点的大陆岩石圈内,而且古亚洲洋同时向南、北两侧俯冲(Xiao et al., 2003; Xu et al., 2015),因此,华北板块和西伯利亚板块拼贴之前古亚洲洋板片长期向北俯冲的脱水熔融过程将也是岩石圈水化的关键。在这个过程中,成矿前的大洋板片俯冲以及相关的脱水及脱水熔融产生的富集成矿元素和大离子亲石元素的熔体,交代改造南、北2个钼成矿带的陆下岩石圈地幔,进而构成钼成矿带的成矿源区。

(2)(再)富集岩浆源区的脱水熔融及其动力学机制

由于古亚洲洋向华北板块和西伯利亚板块南、北两侧的持续俯冲水化了岩石圈,构成了富集成矿元素、水和大离子亲石元素的陆下岩石圈地幔成矿源区(如从中抽取的熔体形成的富含黑云母的碱性岩浆和花岗岩的 Sm/Nd 比值为 $0.2\sim 0.16$)。虽然研究认为,陆下岩石圈地幔的成分和年龄均具有多相性(Song et al., 1989; Wu et al., 2003c; Gao et al., 2008),但这种富集成矿元素、水和大离子亲石元素的源区也就进入了化学上的不稳定状态,具有脱流体化的趋势,以使其化学组成与稳定陆下岩石圈地幔趋于一致(Sm/Nd 比值可能为 0.4)。将这种趋势表述为陆下岩石圈地幔(可能也包括下地壳)的两端员化和均一化过程,即是洋片俯冲作用改造的富集的陆下岩石圈地幔排出早期加入其中的成矿元素、水和大离子亲石元素使其(再次)达到稳定状态。2个端员:一为化学上难溶的端员(石榴子石地幔橄榄岩和榴辉岩?),继续残留于陆下岩石圈地幔和下地壳;二为部分熔融形成的熔体相,在伸展构造环境下就位于地壳浅部形成富碱性岩浆,如在华北板块北缘所观察到的三叠纪硅不饱和的碱性侵入岩和高分异的钼花岗岩,其中硅不饱和的碱性侵入岩是深部直接就位到地壳浅部的产物,高分异钼花岗岩则在岩石圈不同尺度经历了混染和演化,形成了较大规模的岩浆房,使成矿金属和水得到进一步富集。伸展环境下脱水过程结束后,俯冲改造的富集的陆下岩石圈地幔再次回到化学上的稳定状态,化学成分上与未水化古老陆下岩石圈地幔趋于一致,但是同位素组成会被明显改造,其模式年龄趋于年轻化。俯冲结束后,三叠纪至侏罗纪岩石圈的强烈伸展可能促使了陆下岩石圈地幔的减压、脱水部分熔融。

白垩纪开始,增强的壳幔相互作用可能促使陆下岩石圈地幔的进一步部分脱水、熔融。

(3)伸展环境为高分异岩浆的形成提供了重要条件

兴蒙造山带这种早期俯冲阶段对于岩石圈地幔的改造并水化造山带,明显增加了岩石圈的水含量和大离子亲石元素,进而明显降低陆下岩石圈地幔的固相线(Wyllie, 1988)。古生代期间长期的板块俯冲作用对陆下岩石圈地幔进行了强烈的改造,富集的陆下岩石圈地幔两端员化过程将形成大规模的富集大离子亲石元素的熔体,由相对富集的源区(从三叠纪陆下岩石圈地幔抽取的含水富碱岩浆 Sm/Nd 比值为 $0.2\sim 0.16$)逐渐演化到相对亏损的源区(新生代脱水后的陆下岩石圈地幔 Sm/Nd 比值为 0.4)。抽取的岩浆 Sm/Nd 比值与源区相比要富1倍以上。 Sm 、 Nd 均为稀土元素,地球化学属性相近,因此陆下岩石圈地幔抽取富集型岩浆的过程中,需要经过长期的低程度批式部分熔融,才能分异出大量的富集大离子亲石元素的岩浆,并在地壳浅部表现为长时间、多阶段的和大规模的岩浆活动。板块俯冲作用结束后,相比洋片俯冲阶段来说,热流值是逐渐降低的,使得岩浆活动与洋片俯冲作用有关的岩浆活动相比,体现为部分熔融程度更低的脱水熔融作用,从而形成持续的碱性、偏碱性岩浆。钼具有高度不相容属性和亲流体属性,高度演化的岩浆有利于钼的富集,由于钼元素具有较高的流岩分配系数,脱水熔融产生的岩浆就位到地壳浅部区域后,通过大规模多阶段岩浆演化将逐渐使得钼元素分配到晚期的流体中并发生矿化(Audétat, 2010; Audétat et al., 2011; Lerchbaumer et al., 2013)。

(4)(再)富集的岩浆源区脱水熔融的生命周期

古亚洲洋早期俯冲阶段对于岩石圈地幔的改造并水化造山带,进而形成含有巨量水的储库,构成了俯冲结束后巨型钼成矿带成矿热液的重要源区,也是南、北2个钼成矿带内钼成矿作用涉及范围广、持续时间长的主要原因。由于古亚洲洋板块俯冲结束后,通过海水水化的洋壳俯冲脱水熔融的方式带入地幔楔并水化造山带的机制也就随之停止,因此,兴蒙造山带及华北板块北缘陆下岩石圈地幔(以及可能的下地壳)也就进入了持续的脱水熔融过程,当其中的水含量在演化过程中逐渐释放至稳定陆下岩石圈地幔的水平,从而完成向普通岩石圈的转化。这个过程结束后,近地表的热液成矿作用也同样趋于

结束,这也就解释了为何在兴蒙造山带及其邻区,白垩纪之后,虽然古太平洋还在俯冲的情况下,斑岩钼矿床甚至其他热液矿床的成矿作用,却逐渐趋于减弱和熄灭的原因,同时也解释了为何在新生代存在与地幔软流圈上涌有关的大规模碱性玄武岩活动,却没有钼矿化与之共生,甚至也不发育其他类型的热液矿化。这个周期也是脱水熔融的总周期,在兴蒙造山带及华北板块北缘可能长达 100~170 Ma。这个生命总周期与古生代期间(也可能始于元古代)俯冲脱水熔融过程中(再次)带入到岩石圈中的大离子亲水元素和水的量有关,带入的量越大,则俯冲后伸展环境下脱水熔融过程将越长,热液成矿的总周期也将越长,直到脱水熔融结束。也与强烈伸展作用有关,伸展作用越强,脱水熔融的程度则越强,斑岩钼矿化也越强,因此,伸展活动的强弱变化决定了总周期内钼矿化的多期性。

(5) 与洋壳俯冲构造-岩浆-热液斑岩成矿模式的异同

与板块俯冲有关的斑岩铜矿与伸展环境下的斑

岩钼矿床的矿化特点具有非常大的共性。如,大部分矿床的形成均与浅成就位的小斑岩体有直接的成因联系,矿床常常围绕成矿斑岩体形成明显的矿化和蚀变分带。该特点体现了成矿作用过程中释放了巨量的热液,这也从大量斑岩铜、钼矿化的元素地球化学特征得以证实,显示脱水熔融在巨型斑岩成矿带的形成过程中具有重要的作用,也显示成矿源区是特定构造作用下水化的结果。对于俯冲板块有关的斑岩铜矿床来说,同时代洋壳俯冲过程中的脱水作用(沉积物的脱水以及可能存在的洋壳的脱水)提供了巨量水的来源,相同的俯冲环境也控制了斑岩铜矿化在地壳浅部的就位,也就是说塑造源区的构造和控制斑岩铜矿化就位的构造是耦合的。对于兴蒙造山带及华北板块北缘古生代末期至中生代的钼矿化来说,古生代俯冲构造体制起到了关键性的作用,塑造了成矿元素富集的源区,水化了造山带,增厚了岩石圈,建立了钼矿化发生的基础(图 8),但是成矿作用却发生在俯冲结束以后的伸展环境之中,显示塑造源区的构造和控制钼矿化就位的构造

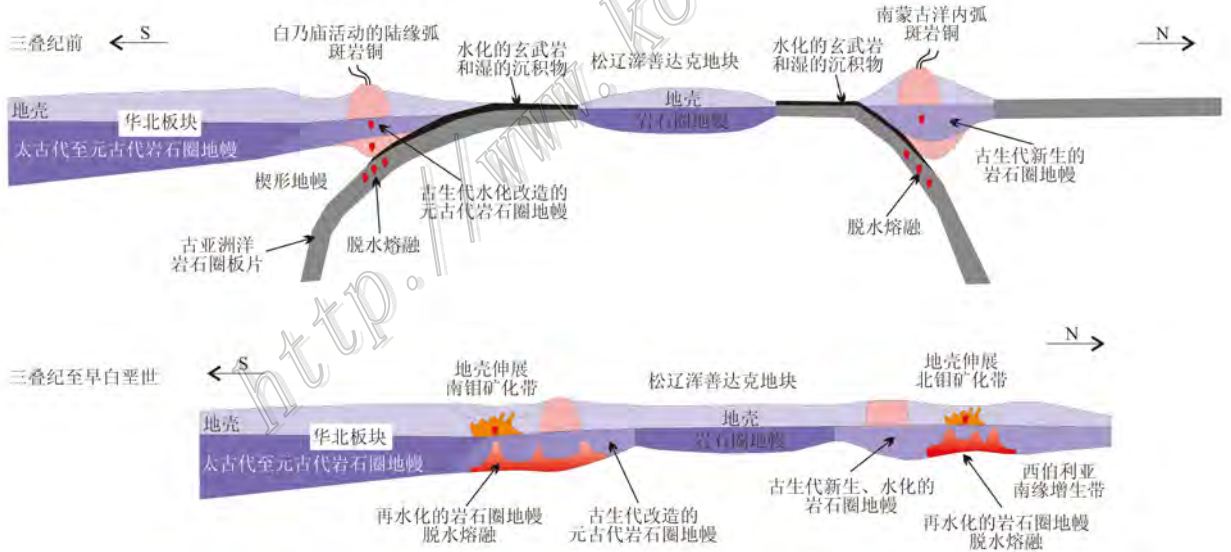


图 8 兴蒙造山带及华北板块北缘斑岩钼成矿带构造-岩浆成矿模式图

古生代期间古亚洲洋向南北两侧俯冲,脱水熔融交代南侧华北板块陆下岩石圈地幔,使之水化和成矿元素再富集,同时也在北侧形成富集水和成矿元素的新生岩石圈。古亚洲洋关闭之后的南北两侧富水岩石圈在伸展环境下脱水熔融形成富水碱性岩浆,从而形成古生代末期至中生代期间的南、北 2 条巨型钼成矿带

Fig. 8 Schematic diagram showing the tectono-magmatic model for porphyry Mo deposits in Xing'an-Mongolia orogen and its adjacent areas

The model indicates that the subduction of paleo-asian ocean slab under the North China and Siberia plates during Paleozoic metasomatized the Proterozoic metal and water-depleted SCLM of North China Craton, and formed juvenile, water and metals-rich lithosphere in the accretionary terrain on the south margin of Siberia plate; this process led to a fertile magma source for the Mesozoic post-subduction porphyry Mo deposits, which indicates a genetic relationship between subduction-metasomatized SCLM and post subduction extensional setting porphyry Mo deposits

是解耦的。国际上大量的研究也显示,碰撞后岩浆作用常常继承了一定的俯冲带岩浆活动的地球化学属性(Liégeois et al., 1998; Coulon et al., 2002; Avanzinelli et al., 2008; Richards, 2009; El-Bialy, 2010),也反映了控制早期源区塑造与后期岩浆侵位构造的解耦。因此,从某种程度上讲,兴蒙造山带及华北板块北缘钼矿化实际上是俯冲作用的后续效应,古生代末期开始的兴蒙造山带钼矿化实际上是古生代古亚洲洋俯冲构造体制的延续和发展,也是古生代俯冲构造改造的源区与中生代伸展构造的复合成矿。

通过上述的对比研究,笔者提出了兴蒙造山带及华北板块北缘钼成矿带的构造-岩浆成矿模型(图 8)。

志 谢 本文是从钼矿床成矿岩浆源区塑造过程的角度对兴蒙造山带及华北板块北缘 2 条巨型钼多金属成矿带的成因所作的初步性探讨。文中缺点与谬误敬请同行批评指正,观点不同与不妥之处也敬请谅解。中国地质大学刘家军教授、中国地质科学院地质研究所杨志明研究员和中科院地质与地球物理研究所周新华研究员对本文提出了许多建设性意见和建议,马旭东博士也与作者一起讨论了大量的科学问题,在此一并表示感谢。

References

- Aldrich M J, Chapin C E and Laughlin A W. 1986. Stress history and tectonic development of the Rio Grande Rift, New Mexico [J]. *Journal of Geophysical Research*, 91(B6): 6199-6211.
- Anthony E Y, Segalstad T V and Neumann E R. 1989. An unusual mantle source region for nephelinites from the Oslo Rift, Norway [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53: 1067-1076.
- Audétat A and Pettke T. 2003. The magmatic-hydrothermal evolution of two barren granites: A melt and fluid inclusion study of the Rito del Medio and Canada Pinabete plutons in northern New Mexico (USA) [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(1): 97-121, 2003.
- Audétat A and Pettke T. 2006. Evolution of a porphyry-Cu mineralized magma system at Santa Rita, New Mexico (USA) [J]. *Journal of Petrology*, 47(10): 2021-2046.
- Audétat A, Pettke T, Heinrich C A and Bodnar R J. 2008. Special paper: The composition of magmatic-hydrothermal fluids in barren and mineralized intrusions [J]. *Econ. Geol.*, 103(5): 877-908.
- Audétat A. 2010. Source and evolution of molybdenum in the porphyry Mo(-Nb) deposit at Cave Peak, Texas [J]. *Journal of Petrology*, 51(8): 1739-1760.
- Audétat A, Dolejs D and Lowenstern J B. 2011. Molybdenite saturation in silicic magmas: Occurrence and petrological implications [J]. *Journal of Petrology*, 52(5): 891-904.
- Audétat A. 2015. Compositional evolution and formation conditions of magmas and fluids related to porphyry Mo mineralization at Climax, Colorado [J]. *Journal of Petrology*, 56(8): 1519-1546.
- Avanzinelli R, Elliott T, Tommasini S and Conticelli S. 2008. Constraints on the genesis of Potassium-rich Italian volcanic rocks from U/Th disequilibrium [J]. *Journal of Petrology*, 49(2): 195-223.
- Baier J, Audétat A and Keppler H. 2008. The origin of the negative niobium-tantalum anomaly in subduction zone magmas [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 267: 290-300.
- Berglund H T, Sheehan A F, Murray M H, et al. 2012. Distributed deformation across the Rio Grande Rift, Great Plains, and Colorado Plateau [J]. *Geology*, 40(1): 23-26.
- Bingen B and Stein H J. 2003. Molybdenite Re-Os dating of biotite dehydration melting in the Rogaland high-temperature granulites, S Norway [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 208: 181-195.
- Bjørlykke A, Ihlen P M and Olerud S. 1990. Metallogeny and lead isotope data from the Oslo Paleorift [J]. *Tectonophysics*, 178: 109-126.
- Brandon, A D and Draper D S. 1996. Constraints on the origin of the oxidation state of mantle overlying subduction zones: An example from Simcoe, Washington, USA [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60: 1739-1749.
- Brooks C K. 2004. Re-Os and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of porphyry molybdenum deposits in the East Greenland volcanic-rifted margin [J]. *Econ. Geol.*, 99: 1215-1222.
- Cai M H, Zhang Z G, Qu W J, Peng Z A, Zhang S Q, Xu M, Chen Y and Wang X B. 2011a. Geological characteristics and Re-Os dating of the Chaganhua molybdenum deposit in Urad Rear Banner, western Inner Mongolia [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(1): 64-68 (in Chinese with English abstract).
- Cai M H, Peng Z G, Qu W J, He Z Y, Feng G, Zhang Q S, Xu M and Chen Y. 2011b. Geological characteristics and Re-Os dating of molybdenites in Chagandeersi molybdenum deposit, western Inner Mongolia [J]. *Mineral Deposits*, 30(3): 377-384 (in Chinese with English abstract).
- Cameron E M. 1989. Scouring of gold from the lower crust [J]. *Geology*, 17: 26-29.
- Candela P A and Holland H D. 1984. The partitioning of copper and molybdenum between silicate melts and aqueous fluids [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48: 373-380.
- Candela P A and Holland H D. 1986. A mass transfer model for copper

- and molybdenum in magmatic hydrothermal systems: The origin of porphyry-type ore deposits[J]. *Econ. Geol.*, 81: 1-19.
- Candela P A and Bouton S L. 1990. The influence of oxygen fugacity on tungsten and molybdenum partitioning between silicate melts and ilmenite[J]. *Econ. Geol.*, 85: 633-640.
- Candela P A and Piccoli P M. 2005. Magmatic processes in the development of porphyry-type ore systems[M]. In: Hedenquist J W, Thompson J F H, Goldfarb R J, Richards J P, eds. *Economic Geology One Hundredth Anniversary Volume, 1905-2005*: 25-38.
- Carroll M R and Rutherford M J. 1985. Sulfide and sulfate saturation in hydrous silicate melts[J]. *Journal of Geophysical Research*, 90 (Supp.): C601-C612.
- Carten R B, White W H and Stein H J. 1993. High-grade granite related molybdenum systems: Classification and origin[A]. In: Kirkham R V, Sinclair W D, Thorpe R I, Duke J M, eds. *Mineral deposit modeling*[M]. Geological Association of Canada Special Paper. 40: 521-554.
- Carten R B, Geraghty E P and Walker B M. 1988. Cyclic development of igneous features and their relationship to high-temperature hydrothermal features in the Henderson porphyry molybdenum deposit, Colorado[J]. *Econ. Geol.*, 83: 266-296.
- Chapin C E. 2012. Origin of the Colorado mineral belt[J]. *Geosphere*, 8(1): 28-43.
- Chen B, Jahn B M and Tian W. 2009. Evolution of the Solonker suture zone: Constraints from zircon U-Pb ages, Hf isotopic ratios and whole-rock Nd-Sr isotope compositions of subduction and collision-related magmas and forearc sediments[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34: 245-257.
- Chen W J, Liu J M, Liu H T, Sun X G, Zhang R B, Zhang Z L and Qin F. 2010. Geochronology and fluid inclusion study of the Jiguanshan porphyry Mo deposit, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1423-1436 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y J, Zhang C, Li N, Yang Y and Deng K. 2012. Geology of the Mo deposits in northeast China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Sci. Edition)*, 42(5): 1223-1268 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y J, Zhang C, Wang P, Pirajno F and Li N. 2016. The Mo deposits of Northeast China: A powerful indicator of tectonic settings and associated evolutionary trends[J]. *Ore Geology Reviews*, 81(2): 602-640.
- Chen Z G, Zhang L C, Wu H Y, Wan B and Zeng Q D. 2008. Geochemistry study and tectonic background of a style host granite in Nianzigou molybdenum deposit in Xilamulun molybdenum metallogenic belt, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 879-889 (in Chinese with English abstract).
- Chen Z G, Zhang L C, Wan B, Wu H Y and Cleven N. 2011. Geochronology and geochemistry of the Wunugetushan porphyry Cu-Mo deposit in NE China, and their geological significance[J]. *Ore Geology Reviews*, 43: 92-105.
- Chu S X, Zeng Q D, Liu J M, Zhang W Q, Zhang Z L, Zhang S and Wang Z C. 2010. Characteristics and its geological significance of fluid inclusions in Chehugou porphyry Mo-Cu deposit, Xilamulun molybdenum metallogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2465-2481 (in Chinese with English abstract).
- Cline J S and Bodnar R J. 1991. Can economic porphyry copper mineralization be generated by a typical calc-alkaline melt[J]? *Journal of Geophysical Research*, 96(B5): 8113-8126.
- Clough P W and Field D. 1980. Chemical variation in metabasites from a Proterozoic amphibolite-granulite transition zone, South Norway[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 73(3): 277-286.
- Corfu F and Dahlgren S. 2008. Perovskite U-Pb ages and the Pb isotopic composition of alkaline volcanism initiating the Permo-Carboniferous Oslo Rift[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 265: 256-269.
- Coulon C, Megaritsi M, Fourcade S, Maury R C, Bellon H, Louni-Hacini A, Cotton J, Coutelle A and Hermitte D. 2002. Post-collisional transition from calc-alkaline to alkaline volcanism during the Neogene in Oranie (Algeria): Magmatic expression of a slab breakoff[J]. *Lithos*, 62: 87-110.
- Dai J Z, Mao J W, Zhao C S, Xie G Q, Yang F Q and Wang Y T. 2009. New U-Pb and Re-Os age data and the geodynamic setting of the Xiaojiaingzi Mo (Fe) deposit, western Liaoning Province, Northeastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 35: 235-244.
- Davis G A, Zheng Y D, Wang C, Darby B J, Zhang C H and Gehrels G. 2001. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning Provinces, northern China[C]. *Memoirs-Geological Society of America*. 171-198.
- De Hoog J C M, Mason P R D and van Bergen M M. 2001. Sulfur and chalcophile elements in subduction zones: Constraints from a laser ablation ICP-MS study of melt inclusions from Galunggung Volcano, Indonesia[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(18): 3147-3164.
- Ding C W, Nie F J, Bagas L, Dai P, Jiang S H, Ding C Z, Liu C H, Peng Y B, Zhang G X and Shao G Y. 2016. Pyrite Re-Os and zircon U-Pb dating of the Tugurige gold deposit in the western part of the Xing'an-Mongolia Orogenic Belt, China and its geological significance[J]. *Ore Geology Reviews*, 72: 669-681.
- Dolgoplova A, Seltnann R, Armstrong R, Belousova E, Pankhurst R J and Kavalieris I. 2013. Sr-Nd-Pb-Hf isotope systematics of the Hugo Dummett Cu-Au porphyry deposit (Oyu Tolgoi, Mongolia)[J]. *Lithos*, 164: 47-64.
- Duan H C, Qin Z Y, Lin X H, Zhang B H, Liu X W, Zhang X, Guo P Z, Han F, Qin L and Dai J Z. 2007. Zircon U-Pb ages of intrusive bodies in Dacaping molybdenum ore district, Fengning County, Hebei Province[J]. *Mineral Deposits*, 26(6): 634-642 (in Chinese).

- with English abstract).
- Dungan M A , Lindstrom M M , McMillan N J , Moorbath S , Hoefs J and Haskin L. 1986. Open system magmatic evolution of the Taos Plateau volcanic field , northern New Mexico I : The petrology and geochemistry of the Servilleta basal[J]. *Journal of Geophysical Research* , 9 : 5999-6028.
- El-Bialy M Z. 2010. On the Pan-African transition of the Arabian-Nubian Shield from compression to extension : The post-collision Dokhan volcanic suite of Kid-Malhak region , Sinai , Egypt[J]. *Gondwana Research* , 17 : 26-43
- Farges F , Siewert R , Brown G E , Guesdon A and Morin G. 2006a. Structural environments around molybdenum in silicate glasses and melts. I . Influence of composition and oxygen fugacity on the local structure of molybdenum[J]. *The Canadian Mineralogist* , 44(3) : 731-753.
- Farges F , Siewert R , Ponader C W , Brown G E , Pichavant M and Behrens H. 2006b. Structural environments around molybdenum in silicate glasses and melts. II . Effect of temperature , pressure , H₂O , halogens and sulfur[J]. *The Canadian Mineralogist* , 44(3) : 755-773.
- Gao J , John T , Klemd R and Xiong X M. 2007. Mobilization of Ti-Nb-Ta during subduction : Evidence from rutile-bearing dehydration segregations and veins hosted in eclogite , Tianshan , NW China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 71 : 4974-4996.
- Gao S , Rudnick R L and Carlson R W. 2003. Removal of lithospheric mantle in the North China craton : Re-Os isotopic evidence for coupled crust-mantle growth[J]. *Earth Science Frontiers* , 10(3) : 61-68(in Chinese with English abstract).
- Gao S , Rudnick R L , Xu W L , Yuan H L , Liu Y S , Walker R J , Puchtel I S , Liu X M , Huang H , Wang X R and Yang J. 2008. Recycling deep cratonic lithosphere and generation of intraplate magmatism in the North China Craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters* , 270(1) : 41-53.
- Gibson S A , Thompson R N , Leat P T , Morrison M A , Hendry G L , Dickin A P and Mitchell J G. 1993. Ultrapotassic magmas along the flanks of the Oligo-Miocene Rio Grande rift , USA : Monitors of the zone of lithospheric mantle extension and thinning beneath a continental rift[J]. *Journal of Petrology* , 34 : 187-228.
- Goss A R and Kay S M. 2009. Extreme high field strength element (HFSE) depletion and near-chondritic Nb/Ta ratios in Central Andean adakite-like lavas (~28°S , ~68°W)[J]. *Earth and Planetary Science Letters* , 279 : 97-109.
- Green T H and Pearson N J. 1987. An experimental study of Nb and Ta partitioning between Ti-rich minerals and silicate liquids at high pressure and temperature[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 51 : 55-62.
- Griffin W L , Begg G C and O'Reilly S Y. 2013. Continental-root control on the genesis of magmatic ore deposits[J]. *Nat. Geosci.* , 6(11) : 905-910.
- Groves D I and Bierlein F P. 2007. Geodynamic settings of mineral deposit systems[J]. *Journal of the Geological Society* , 164 : 19-30.
- Guo F , Fan W M , Gao X F , Li C W , Miao L C , Zhao L and Li H X. 2010. Sr-Nd-Pb isotope mapping of Mesozoic igneous rocks in NE China : Constraints on tectonic framework and Phanerozoic crustal growth[J]. *Lithos* , 120 : 563-578.
- Guo P , Niu Y , Sun P , Ye L , Liu J , Zhang Y , Feng Y X and Zhao J X. 2016. The origin of Cenozoic basalts from central Inner Mongolia , East China : The consequence of recent mantle metasomatism genetically associated with seismically observed paleo-Pacific slab in the mantle transition zone[J]. *Lithos* , 240 : 104-118.
- Hacker B R , Ratschbacher L , Webb L , Ireland T , Walker D and Shuwen D. 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen , China[J]. *Earth and Planetary Science Letters* , 161 : 215-230.
- Han C M , Xiao W J , Zhao G C , Sun M , Qu W J and Du A D. 2009. A Re-Os study of molybdenites from the Lanjiagou Mo deposit of North China Craton and its geological significance[J]. *Gondwana Research* , 16(2) : 264-271.
- Hao Y J , Ren Y S , Zhao H L , Zhou X T , Chen C , Hou Z S and Qu W J. 2013. Re-Os isotopic dating of the molybdenite from the Cuihongshan W-Mo polymetallic deposit in Heilongjiang Province and its geological significance[J]. *Journal of Jilin University : Earth Science Edition* , 43(6) : 1840-1850(in Chinese with English abstract).
- Harry D L and Leeman W P. 1995. Partial melting of melt metasomatized subcontinental mantle and the magma source potential of the lower lithosphere[J]. *Journal of Geophysical Research* , 100(B6) : 10255-10269.
- Hedenquist J W and Lowenstern J B. 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits[J]. *Nature* , 370 : 519-527.
- Herd C D. 2008. Basalts as probes of planetary interior redox state[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* , 68 : 527-553.
- Hildreth W and Moorbath S. 1988. Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of central Chile[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology* , 98 : 455-489.
- Hou W R , Nie F J , Du A D , Li C , Jiang S H , Bai D M and Liu Y. 2010a. Re-Os isotopic dating of molybdenite from Xishadagai molybdenum deposit in Urad Front Banner of Inner Mongolia and its geological significance[J]. *Mineral Deposits* , 29(6) : 1043-1053(in Chinese with English abstract).
- Hou W R , Nie F J , Jiang S H , Bai D M , Liu Y , Yun F and Liu Y F. 2010b. The geology and ore-forming mechanism of the Tsagaan Suvarga large-size Cu-Mo porphyry deposit in Mongolia[J]. *Acta Geoscientica Sinica* , 31(3) : 307-320(in Chinese with English abstract).

- Hou Z Q, Zheng Y C and Geng Y S. 2015. Metallic refertilization of lithosphere along cratonic edges and its control on Au, Mo and REE ore systems[J]. *Mineral Deposits*, 34(4): 641-674 (in Chinese with English abstract).
- Hu X L, Yao S Z, He M C, Ding Z J, Liu M, Cui Y B and Shen J. 2015. Sulfur and lead characteristics of Chalukou and Daheishan porphyry Mo deposits in northern segment of Da Hingan Mountain[J]. *Mineral Deposits*, 33(4): 776-784 (in Chinese with English abstract).
- Huang D H, Du A D, Wu C Y, Liu L S, Sun Y L and Zou X Q. 1996. Metalochronology of molybdenum (-copper) deposits in the North China Platform: Re-Os age of molybdenite and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 15(4): 365-373 (in Chinese with English abstract).
- Huang F, Wang D H, Wang P A, Wang C H, Liu S B, Liu C H, Xie Y W, Zheng B H and Li S B. 2014. Petrogenesis and metallogenic chronology of the Yili Mo deposit in the Northern Great Khing'an Ranges[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(3): 361-379 (in Chinese with English abstract).
- Jahn B M, Wu F Y and Chen B. 2000. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic[J]. *Episodes*, 23(2): 82-92.
- Jahn B M, Wu F Y, Capdevila R, Martineau F, Zhao Z H and Wang Y X. 2001. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: The Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China[J]. *Lithos*, 59: 171-198.
- Jiang S H, Nie F J, Bai D M, Liu Y F and Liu Y. 2011. Geochronology evidence for Indosinian mineralization in Baiyinnuoer Pb-Zn deposit of Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 30(5): 787-798 (in Chinese with English abstract).
- Jiang S H, Liang Q L and Bagas L. 2014. Re-Os ages for molybdenum mineralization in the Fengning region of northern Hebei Province, China: New constraints on the timing of mineralization and geodynamic setting[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 873-883.
- Jiang S H, Bagas L, Hu P, Han N, Chen C L, Liu Y F and Kang H. 2016. Zircon U-Pb ages and Sr-Nd-Hf isotopes of the highly fractionated granite with tetrad REE patterns in the Shamao tungsten deposit in eastern Inner Mongolia, China: Implications for the timing of mineralization and ore genesis[J]. *Lithos*, 261: 322-339.
- Jin L Y, Qin K Z, Meng Z J, Li G M, Song G X, Li Z Z, Lü K P, Kan X S and Zhao C. 2014. Features and occurrences of veins in Chalukou deposit, northern segment of Da Hingan Mountains, and their indications for mineralization[J]. *Mineral Deposits*, 33(4): 742-760 (in Chinese with English abstract).
- Jin L Y, Qin K Z, Li G M, Li Z Z, Song G X and Meng Z J. 2015. Trace element distribution in sulfides from the Chalukou porphyry Mo-vein-type Zn-Pb system, northern Great Xing'an Range, China: Implications for metal source and ore exploration[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(8): 2417-2434 (in Chinese with English abstract).
- Ju N, Ren Y S, Wang C, Wang H, Zhao H L and Qu W J. 2012. Ore genesis and molybdenite Re-Os dating of Dashihe molybdenum deposit in Dunhua, Jilin[J]. *Global Geology*, 31(1): 68-76 (in Chinese with English abstract).
- Jugo P J, Wilke M and Botcharnikov R E. 2010. Sulfur K-edge XANES analysis of natural and synthetic basaltic glasses: Implications for S speciation and S content as function of oxygen fugacity[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74: 5926-5938.
- Keith J D and Shanks W C. 1988. Chemical evolution and volatile fugacities of the Pine Grove porphyry molybdenum and ash-flow tuff system, southwestern Utah[A]. In: Taylor R P and Strong D F, eds. Recent advances in the geology of granite-related mineral deposits[M]. Canadian Institute of Mining and Metallurgy Special Volume, 39: 402-423.
- Keith J D, Shanks W C, Archibald D A, et al. 1986. Volcanic and intrusive history of the Pine Grove porphyry molybdenum system, southwestern Utah[J]. *Econ. Geol.*, 81: 553-577.
- Khashgerel B E, Rye R O, Hedenquist J W and Kavalieris I. 2006. Geology and reconnaissance stable isotope study of the Oyu Tolgoi porphyry Cu-Au system, South Gobi, Mongolia[J]. *Econ. Geol.*, 101(3): 503-522.
- Klemm L M, Pettke T and Heinrich C A. 2008. Fluid and source magma evolution of the Questa porphyry Mo deposit, New Mexico, USA[J]. *Mineralium Deposita*, 43: 533-552.
- Klemme S, Prowatke S, Hametner K and Günther D. 2005. Partitioning of trace elements between rutile and silicate melts: Implications for subduction zones[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(9): 2361-2371.
- Kovalenko V I, Yarmoluyk V V, Salnikova E B, Kozlovsky A M, Kotoy A B, Kovach V P, Savatenkov V M, Vladykin N V and Ponomarchuk V A. 2006. Geology, geochronology, and geodynamics of the Khan Bogd alkali granite pluton in southern Mongolia[J]. *Geotectonics*, 40(6): 450-466.
- Lee C A. 2005. Trace element evidence for hydrous metasomatism at the base of the North American lithosphere and possible association with Laramide Low-Angle Subduction[J]. *The Journal of Geology*, 113: 673-685.
- Leng C B, Zhang X C, Huang Z L, Huang Q Y, Wang S X, Ma D Y, Luo T Y, Li C and Li W B. 2015. Geology, Re-Os ages, sulfur and lead isotopes of the Diyanqinamu porphyry Mo deposit, Inner Mongolia, NE China[J]. *Econ. Geol.*, 110(2): 557-574.
- Lerchbaumer L and Audétat A. 2013. The metal content of silicate melts and aqueous fluids in subeconomically Mo mineralized granites: Implications for porphyry Mo genesis[J]. *Econ. Geol.*, 108(5): 987-

- 1013.
- Li J J, Tang W L, Fu C, Li C, Qu W J, Zhang T, Wang S G, Dang Z C, Zhou Y and Zhao L J. 2016. Re-Os isotopic dating of molybdenites from the Bilugangan porphyry Mo deposit in Abag Banner, Inner Mongolia, and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 35(4): 519-523 (in Chinese with English abstract).
- Li J Y. 2006. Permian geodynamic setting of northeast China and adjacent regions: Closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 26: 207-224.
- Li L X, Song Q H, Wang D H, Wang C H, Qu W J, Wang Z G, Bi S Y and Yu C. 2009. Re-Os isotopic dating of molybdenite from the Fu'anpu molybdenum deposit of Jilin Province and discussion on its metallogenesis[J]. Rock and Mineral Analysis, 28(3): 283-287 (in Chinese with English abstract).
- Li W B, Zhong R C, Xu C, Song B and Qu W J. 2012. U-Pb and Re-Os geochronology of the Bainaimiao Cu-Mo-Au deposit, on the northern margin of the North China Craton, Central Asia Orogenic Belt: Implications for ore genesis and geodynamic setting[J]. Ore Geology Reviews, 48: 139-150.
- Li Y Q, Ma C Q and Robinson P T. 2016. Petrology and geochemistry of Cenozoic intra-plate basalts in East-Central China: Constraints on recycling of an oceanic slab in the source region[J]. Lithos, 262: 27-43.
- Li Z X. 1994. Collision between the North and South China blocks: A crustal-detachment model for suturing the region east of the Tanlu fault[J]. Geology, 22: 739-742.
- Li Z Z, Qin K Z, Li G M, Ishihara S, Jin L Y, Song G X and Meng Z J. 2014. Formation of the giant Chalukou porphyry Mo deposit in northern Great Xing'an Range, NE China: Partial melting of the juvenile lower crust in intra-plate extensional environment[J]. Lithos, 202: 138-156.
- Liégeois J P, Navez J, Hertogen J and Black R. 1998. Contrasting origin of post-collisional high-K calc-alkaline and shoshonitic versus alkaline and peralkaline granitoids: The use of sliding normalization[J]. Lithos, 45: 1-28.
- Lin Q, Ge W C, Cao L, Sun D Y and Lim K G. 2003. Geochemistry of Mesozoic volcanic rocks in Da Hinggan Ling: The bimodal volcanic rocks[J]. Geochimica, 32(3): 208-222 (in Chinese with English abstract).
- Liu J, Mao J, Wu G, Wang F, Luo D and Hu Y. 2014. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating of the Chalukou porphyry Mo deposit in the northern Great Xing'an Range, China and its geological significance[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 79: 696-709.
- Liu J, Mao J W, Wu G, Wang F, Luo D F and Hu Y Q. 2015. Geochemical signature of the granitoids in the Chalukou giant porphyry Mo deposit in the Heilongjiang Province, NE China[J]. Ore Geology Reviews, 64: 35-52.
- Liu W Z, Sun F Y, Huang W P, Wang L L, Su B and Huan F M. 2014. Zircon U-Pb ages and petrochemical characteristics of Bangzishan granite in Fu'anpu of Jilin and their geological significance[J]. Global Geology, 33(2): 290-298 (in Chinese with English abstract).
- Liu X H and Hao J. 1989. Structure and tectonic evolution of the Tongbai-Dabie Range in the East Qinling collisional belt, China[J]. Tectonics, 8(3): 637-645.
- Liu X L, Fan P, Zheng Z F and Li A L. 2009. The Yangjiazhangzi-Bajiazi molybdenum-polymetal metallogenic belt in western Liaoning Province: Characteristics of typical molybdenum deposits and prediction for exploration[J]. Geology and Resources, 18(2): 110-115 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y, Nie F J, Liu Y F and Hou W R. 2012. Zircon SHRIMP U-Pb dating and geological significance of granite in the Baogeda Ula Mo (W) mining area, Inner Mongolia, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(2): 401-408 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y F, Nie F J, Jiang S H, Xue J, Hou W R and Yun F. 2010. The geochronology and geochemical features of ore-hosting granite in the Aryn nuur molybdenum deposit, Mongolia[J]. Acta Geoscientica Sinica, 31(3): 343-349 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y F, Nie F J, Sun Z J, Lü K P, Zhang K and Liu Y. 2011a. Discovery of Chalukou superlarge scale molybdenum polymetallic deposit, Northern Daxing'anlin Mountain, China, and its significance[J]. Mineral Deposits, 30(4): 759-764 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y F, Nie F J, Jiang S H, Xi Z, Zhang Z G, Xiao W, Zhang K and Liu Y. 2011b. Ore-forming fluid characteristics and ore genesis of Changhua porphyry molybdenum deposit in central Inner Mongolia, China[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 41(6): 1794-1805 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y F, Nie F J, Jiang S H, Hou W R, Liang Q L, Zhang K and Liu Y. 2012a. Geochronology of Zhunsujihua molybdenum deposit in Sonid Left Banner, Inner Mongolia, and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 31(1): 119-128 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y F, Nie F J, Jiang S H, Xi Z, Zhang Z G, Xiao W, Zhang K and Liu Y. 2012b. Ore-forming granites from Chaganhua molybdenum deposit, Central Inner Mongolia, China: Geochemistry, geochronology and petrogenesis[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(2): 409-420 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y F, Fan Z Y, Jiang H C, Nie F J, Jiang S H, Ding C W and Wang F X. 2014. Genesis of the Weilasituo-Bairendaba porphyry-hydrothermal vein type system in Inner Mongolia, China[J]. Acta Geologica Sinica, 88(12): 2373-2385 (in Chinese with English abstract).

- Liu Y F, Nie F J, Jiang S H, Bagas L, Xiao W and Cao Y. 2016a. Geology, geochronology and sulphur isotope geochemistry of the black schist-hosted Haoyaoerhudong gold deposit of Inner Mongolia, China: Implications for ore genesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 73: 253-269.
- Liu Y F, Jiang S H and Bagas L. 2016b. The genesis of metal zonation in the Weilasituo and Bairendaba Ag-Zn-Pb-Cu(Sn-W) deposits in the shallow part of a porphyry Sn-W-Rb system, Inner Mongolia, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 75: 150-173.
- Liu Y Q. 1996. Geology and origin of the Maodeng tin-copper deposit, Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 15(2): 133-143(in Chinese with English abstract).
- Lowenstern J B, Mahood G A, Hervig R L and Sparks J. 1993. The occurrence and distribution of Mo and molybdenite in unaltered peralkaline rhyolites from Pantelleria, Italy [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 114: 119-129.
- Lowenstern J B. 1994. Dissolved volatile concentrations in an ore-forming magma[J]. *Geology* 22: 893-896.
- Lu Z Q, Li X J, Qiu C and Liang B S. 2016. Geology, geochemistry and geochronology of ore-bearing intrusions in Jiditun molybdenum deposit in mid-east Jilin Province[J]. *Mineral Deposits*, 35(2): 349-364(in Chinese with English abstract).
- Ludington S and Plumlee S. 2009a. Climax-type porphyry molybdenum deposits[R]. *Geological survey open-file report 2009-1215*, 16p.
- Ludington S, Hammarstrom J and Piatak N. 2009b. Low-fluorine stockwork molybdenite deposits[R]. *Geological survey open-file report 2009-1211*, 9p.
- Luo W J, Zhang D H and Sun J. 2010. Geochemical characters of mineralization rock of the Sadaigoumen molybdenum deposit and their constraints on the deposit genesis in Fengning, Hebei Province[J]. *Geology and Exploration*, 46(3): 491-505(in Chinese with English abstract).
- Ma X H, Chen B, Lai Y and Lu Y H. 2009. Petrogenesis and mineralization chronology study on the Aolunhua porphyry Mo deposit, Inner Mongolia, and its geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2939-2950(in Chinese with English abstract).
- Ma X H, Chen B and Yang M C. 2013. Magma mixing origin for the Aolunhua porphyry related to Mo-Cu mineralization, eastern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 24(3): 1152-1171.
- Manning D A C. 1981. The effect of fluorine on liquidus phase relationships in the system Qz-Ab-Or with excess water at 1 kbar[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 76: 206-215.
- Mao J W, Xie G Q, Zhang Z H, Li X F, Wang Y T, Zhang C Q and Li Y F. 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 169-188(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Cheng Y B, Guo C L, Yang Z X and Feng J R. 2008. Gejiu tin polymetallic ore-field: Deposit model and discussion for several points concerned[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(11): 1455-1467(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Pirajno F, Xiang J F, et al. 2011. Mesozoic molybdenum deposits in the east Qinling-Dabie orogenic belt: Characteristics and tectonic settings[J]. *Ore Geology Reviews*, 43: 264-293.
- McMillan N J. 1998. Temporal and spatial magmatic evolution of the Rio Grande Rift[M]. *New Mexico Geological Society 49th Field Conference Guidebook*, 107-116.
- Meng Q F, Yu X F and Zheng W. 2016. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and petrogenesis of the quartz monzonite from the Jiditun molybdenum deposit in Jilin Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(5): 917-932(in Chinese with English abstract).
- Meng Q R. 2003. What drove late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract[J]? *Tectonophysics*, 369: 155-174.
- Mercer C N, Hofstra A H, Todorov T I, Roberge J, Burgisser A, Adams D T and Cosca M. 2015. Pre-eruptive conditions of the Hideaway Park topaz rhyolite: insights into metal source and evolution of magma parental to the Henderson porphyry molybdenum deposit, Colorado[J]. *Journal of Petrology*, 56(4): 645-679.
- Moucha R, Forte A M, Rowley D B, Mitrovica J X, Simmons N A and Grand S P. 2008. Mantle convection and the recent evolution of the Colorado Plateau and the Rio Grande Rift valley[J]. *Geology*, 36(6): 439-442.
- Mu B L and Yan G H. 1992. Geochemistry of Triassic alkaline or subalkaline igneous complexes in the Yan-Liao area and their significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 66(2): 108-121(in Chinese with English abstract).
- Mutschler F, Wright E, Ludington S and Abbott J. 1981. Granite molybdenite systems[J]. *Econ. Geol.*, 76(4): 874-897.
- Neumann E R, Olsen K H, Baldrige W S and Sundvoll B. 1992. The Oslo rift: A review[J]. *Tectonophysics*, 208(1-3): 1-18.
- Neumann E R, Dunworth E A, Sundvoll B A, et al. 2002. B1 basaltic lavas in Vestfold-Jeløya area, central Oslo rift: Derivation from initial melts formed by progressive partial melting of an enriched mantle source[J]. *Lithos*, 61: 21-53.
- Nie F J, Wen Y W, Zhao Y Y, Jian G Y, Jiang S H and Zhang W Y. 2007a. Geological features and prospecting directions of Bayanchagan silver polymetallic mineralized area in Xi Ujmqin Banner, central-eastern Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 26(2): 213-220(in Chinese with English abstract).
- Nie F J, Zhang W Y, Du A D, Jiang S H and Liu Y. 2007b. Re-Os isotopic dating on molybdenite separates from the Xiaodonggou porphyry Mo deposit, Hexigten Qi, Inner Mongolia[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(7): 898-905(in Chinese with English abstract).
- Nie F J, Sun Z J, Li C, Liu Y F, Lu K P, Zhang K and Liu Y. 2011.

- Re-Os isotopic dating of molybdenite separates from Chalukou porphyry Mo polymetallic deposit in Heilongjiang Province[J]. *Mineral Deposits*, 30(5):828-836(in Chinese with English abstract).
- Nie F J, Li X Z, Li C, Zhao Y A and Liu Y F. 2013. Re-Os isotopic age dating of the molybdenite separated from the Caosiyao giant molybdenum deposit, Xinghe County, Inner Mongolia, and its geological significances[J]. *Geological Review*, 59(1):175-181(in Chinese with English abstract).
- Niu X L, Yang J S, Liu F, Zhang H Y and Yang M C. 2016. Origin of Baotoudong syenites in North China Craton: Petrological, mineralogical and geochemical evidence[J]. *Science China Earth Sciences* 46:374-391(in Chinese).
- Olsen K H, Baldrige W S and Callender J F. 1987. Rio Grande rift: An overview[J]. *Tectonophysics*, 143(1-3):119-139.
- Perry F V, Baldrige W S and Depaolo D J. 1987. Role of asthenosphere and lithosphere in the genesis of Late Cenozoic basaltic rocks from the Rio Grande Rift and adjacent regions of the southwestern United States[J]. *Journal of Geophysical Research*, 92(B9):9193-9213.
- Pettke T, Oberli F and Heinrich C A. 2010. The magma and metal source of giant porphyry-type ore deposits, based on lead isotope microanalysis of individual fluid inclusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 296:267-277.
- Pirajno F and Zhou T F. 2015. Intracratonic porphyry and porphyry-skarn mineral systems in eastern China: Scrutiny of a special case "Made-in-China"[J]. *Econ. Geol.*, 110(3):603-629.
- Qin F, Liu J M, Zeng Q D and Luo Z H. 2009. Petrogenetic and metallogenetic mechanism of the Xiaodonggou porphyry molybdenum deposit in Hexigten Banner, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(12):3357-3368(in Chinese with English abstract).
- Quadt A V. 2011. Zircon crystallization and the lifetimes of ore-forming magmatic-hydrothermal systems[J]. *Geology*, 39(8):731-734.
- Ren K X, Yan G H, Mu B L, Cai J H, Li F T, Tan L K and Chu Z Y. 2004. Geochemical characteristics and geological implications of the Hekanzi alkaline complex in Lingyuan County, western Liaoning Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 23(3):193-202(in Chinese with English abstract).
- Ren R, Mu B L, Han B F, Zhang L, Chen J F, Xu Z and Song B. 2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the Fanshan potassic alkaline ultramafite-syenite complex in Hebei Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(3):588-594(in Chinese with English abstract).
- Richards J P. 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation[J]. *Econ. Geol.*, 98:1515-1533.
- Richards J P. 2009. Postsubduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits: Products of remelting of subduction-modified lithosphere[J]. *Geology*, 37:247-250.
- Ro H E and Faleide J I. 1992. A stretching model for the Oslo Rift[J]. *Tectonophysics*, 208:19-36.
- Rowe M C and Lassiter J C. 2009. Chlorine enrichment in central Rio Grande Rift basaltic melt inclusions: Evidence for subduction modification of the lithospheric mantle[J]. *Geology*, 37(5):439-442.
- Scailliet B and Macdonald R. 2004. Fluorite stability in silicic magmas[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 147:319-329.
- Schönwandt H K and Petersen J S. 1983. Continental rifting and porphyry-molybdenum occurrences in the Oslo region, Norway[J]. *Tectonophysics*, 94:609-631.
- Seedorff E, Dilles J H, Proffett J M, Einaudi M T, Zurcher L, Stavast W J A, Johnson D A and Barton M D. 2005. Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features[A]. In: Hedenquist J W J, Thompson F H, Goldfarb R J and Richards J P, eds. *Econ. Geol. One Hundredth Anniversary Volume 1905-2005*[C]. 251-298.
- Shao J B. 2014. Characteristics of fluid inclusions of Jidietun and Dashihe Mo deposits in mid-eastern Jilin and their geological significance[J]. *Global Geology*, 33(4):794-807(in Chinese with English abstract).
- Shi Y R, Liu D Y, Zhang Q, Jian P, Zhang F Q, Miao L C and Zhang L Q. 2007. SHRIMP U-Pb zircon dating of Triassic A-type granites in Sonid Zuoqi, central Inner Mongolia, China and its tectonic implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(2):183-189(in Chinese with English abstract).
- Shinohara H, Kazahaya K and Lowenstern J B. 1995. Volatile transport in a convecting magma column: Implications for porphyry Mo mineralization[J]. *Geology*, 23(12):1091-1094.
- Sillitoe R H. 1980. Types of porphyry molybdenum deposits[J]. *Mining Magazine*, 142(6):550-553.
- Sillitoe R H and Perelló J. 2005. Andean copper province: Tectonomagmatic settings[M]. In: Hedenquist J W J, Thompson F H, Goldfarb R J and Richards J P, eds. *Econ. Geol. One Hundredth Anniversary Volume 1905-2005*:845-890.
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems[J]. *Econ. Geol.*, 105:3-41.
- Simmons E C and Hedge C E. 1978. Minor-element and Sr-isotope geochemistry of tertiary stocks, Colorado mineral belt[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 67:379-396.
- Sinclair W D. 2007. Porphyry deposits[A]. In: Goodfellow W D, ed. *Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods*[M]. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, 5:223-243.
- Song Y and Frey F A. 1989. Geochemistry of peridotite xenoliths in basalt from Hannuoba, eastern China: Implications for subcontinent-

- tal mantle heterogeneity[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(1): 97-113.
- Song Y, Frey F A and Zhi X. 1990. Isotopic characteristics of Hannuoba basalts, eastern China: Implications for their petrogenesis and the composition of subcontinental mantle[J]. *Chemical Geology*, 88(1): 35-52.
- Stein H J and Hannah J L. 1985. Movement and origin of ore fluids in Climax-type systems[J]. *Geology*, 13: 469-474.
- Stein H J. 2006. Low-rhenium molybdenite by metamorphism in northern Sweden: Recognition, genesis, and global implications[J]. *Lithos*, 87: 300-327.
- Sun H R, Huang Z L, Li W B, Leng C B, Ma D Y and Zhang X C. 2014. Chronology, geochemistry and Sr-Nd isotope studies of Jurassic intrusions in the Diyanqinamu porphyry Mo mine, Central Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 88: 85-97.
- Sun H R, Huang Z R, Li W B, Ye L and Zhou J X. 2015. Geochronological, isotopic and mineral geochemical constraints on the genesis of the Diyanqinamu Mo deposit, Inner Mongolia, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 70-83.
- Sun J L, Ren Y S, Yang Y S, Wang Q, Liu J B, Zhang J J, Nie W D, Wang A C and Qu W J. 2016. Re-Os isotopic dating of molybdenite from Taipingcun Mo deposit in eastern Hebei and its geological significance[J]. *Global Geology*, 35(3): 738-751 (in Chinese with English abstract).
- Sun Q H, Sun J G, Zhao K Q, Tang C C, Zhang Y, Han S J and Yang F. 2014. Re-Os isotopic dating and geological significance of Luming porphyry molybdenum deposit in Heilongjiang[J]. *Global Geology*, 33(2): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[A]. In: Saunders, A D and Norry M J, eds. *Magmatism in ocean basin*[M]. Geol. Soc. London, Special Publication, 42: 313-342.
- Sun W D, Binns R A, Fan A C, Kamenetsky V S, Wysoczanski R, Wei G J, Hu Y H and Arculus R J. 2007. Chlorine in submarine volcanic glasses from the eastern Manus basin[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(6): 1542-1552.
- Sun W D, Li C Y, Ling M X, Ding X, Yang X Y, Liang H Y, Zhang H and Fan W M. 2015. The geochemical behavior of molybdenum and mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(7): 1807-1818 (in Chinese with English abstract).
- Sundvoll B, Neumann E R, Larsen B T and Tuen E. 1990. Age relations among Oslo Rift magmatic rocks: Implications for tectonic and magmatic modelling[J]. *Tectonophysics*, 178: 67-87.
- Tan H Y, Shu G L, Lü J C, Han R P, Zhang S and Kou L L. 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for the Luming large-scale molybdenum deposit in Xiao Hinggan Mountains and its geological implication[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(6): 1757-1770 (in Chinese with English abstract).
- Tang Y J, Zhang H F and Ying J F. 2014. Genetic significance of Triassic alkali-rich intrusive rocks in the Yinshan and neighboring areas[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 2031-2040 (in Chinese with English abstract).
- Tao J X, Wang T, Chen Z H, Luo Z Z, Xu L Q, Hao X Y and Cui L W. 2009. The Re-Os isotopic dating of molybdenite from the Wulandele molybdenum-copper polymetallic deposit in Sonid Zuoqi of Inner Mongolia and its geological significance[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 28(3): 249-253 (in Chinese with English abstract).
- Tingle T N and Fenn P M. 1984. Transport and concentration of molybdenum in granite molybdenite systems: Effects of fluorine and sulfur[J]. *Geology*, 12: 156-158.
- Tomurtogoo O, Windley B F, Kroner A, Badarch G and Liu Y D. 2005. Zircon age and occurrence of the Adaatsag ophiolite and Muron shear zone, central Mongolia: Constraints on the evolution of the Mongol-Okhotsk ocean, suture and orogen[J]. *Journal of the Geological Society*, 162: 125-134.
- Tong Y, Hong D W, Wang T, Shi X J, Zhang J J and Zeng T. 2010. Spatial and temporal distribution of granitoids in the middle segment of the Sino-Mongolian border and its tectonic and metallogenic implication[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(3): 395-412 (in Chinese with English abstract).
- USGS. 2009. *Minerals Yearbook: Molybdenum* [advance release I R]. <http://www.usgs.gov/>, 15p.
- Van der Voo R, Spakman W and Bijwaard H. 1999. Mesozoic subducted slabs under Siberia[J]. *Nature*, 397(6716): 246-249.
- Vigneresse J L. 2007. The role of discontinuous magma inputs in felsic magma and ore generation[J]. *Ore Geology Reviews*, 30(3): 181-216.
- Wainwright A J, Tosdal R M, Wooden J L, Mazdab F K and Friedman R M. 2011. U-Pb (zircon) and geochemical constraints on the age, origin, and evolution of Paleozoic arc magmas in the Oyu Tolgoi porphyry Cu-Au district, southern Mongolia[J]. *Gondwana Research*, 19: 764-787.
- Wallace S R and Bookstrom A A 1993. The Climax molybdenum system[J]. *CO School of Mines Quart Rev.*, 93: 35-41.
- Wang C H, Song Q H, Wang D H, Li L X, Yu C, Wang Z G, Qu W J, Du A D and Ying L J. 2009. Re-Os isotopic dating of molybdenite from the Daheishan molybdenum deposit of Jilin Province and its geological significance[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 28(3): 269-273 (in Chinese with English abstract).
- Wang H, Ren Y S, Zhao H L, Ju N and Qu W J. 2011. Re-Os dating of molybdenite from the Liushengdian molybdenum deposit in Antu area of Jilin Province and its geological significance[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(6): 707-715 (in Chinese with English abstract).

- Wang Q, Liu X Y and Li J Y. 1991. Paleoplate tectonics in Nei Gonggol of China[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 22: 1-15(in Chinese with English abstract).
- Wang T, Zheng Y D, Zhang J J, Zeng L S, Donskaya T, Guo L and Li J B. 2011. Pattern and kinematic polarity of late Mesozoic extension in continental NE Asia: Perspectives from metamorphic core complexes[J]. Tectonics, 30(6).
- Wang Z L, Jin J, Li Z L and Liu T. 2014. Molybdenite Re-Os dating of the Taipingchuang porphyry Mo(Cu) deposit in center-north Great Xing 'an Range[J]. Mineral Deposits, 31: 45-46(in Chinese).
- Watanabe Y and Stein H J. 2000. Re-Os Ages for the Erdenet and Tsagaan Suvarga porphyry Cu-Mo deposits, Mongolia, and tectonic implication[J]. Econ. Geol., 95(7): 1537-542.
- Westra G and Keith S. 1981. Classification and genesis of stockwork molybdenum deposits[J]. Econ. Geol., 76(4): 844-873.
- White W H, Bookstrom A A, Kamilli R J, Ganster M W, Smith R P and Ranta D E and Steininger R C. 1981. Character and origin of climax-type molybdenum deposits[J]. Econ. Geol., 75th Anniversary Volume: 270-316.
- Whitmeyer S J and Karlstrom K E. 2007. Tectonic model for the Proterozoic growth of North America[J]. Geosphere, 3(4): 220-259.
- Wijk J V, Hunen J V and Goes S. 2008. Small-scale convection during continental rifting: Evidence from the Rio Grande rift[J]. Geology, 36(7): 575-578.
- Williams S. 1984. Late Cenozoic volcanism in the Rio Grande Rift: Trace element, Sr isotopic and Nd isotopic geochemistry of the Taos Plateau volcanics(Ph.D. Thesis [D]. Univ. Minnesota. 202p.
- Wilson D, Aster R, West M, Ni J, Grand S, Gao W, Baldrige W S, Semken S and Patel P. 2005. Lithospheric structure of the Rio Grande rift[J]. Nature, 433: 851-855.
- Windley B F, Alexeev D, Xiao W J, Kroner A and Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. Journal of the Geological Society, 164: 31-47.
- Wolff J A, Rowe M C, Teasdale R, Gardner J N, Ramos F C and Heikoop C E. 2005. Petrogenesis of pre-caldera mafic lavas, Jemez Mountains volcanic field (New Mexico, USA) [J]. Journal of Petrology, 46(2): 407-439.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S and Sun D Y. 2000. Phanerozoic crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China[J]. Tectonophysics, 328(1): 89-113.
- Wu F Y, Sun D Y, Li H M, Jahn B M and Wilde S. 2002. A-type granites in northeastern China, age and geochemical constraints on their petrogenesis[J]. Chemical Geology, 187: 143-173.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, Lo C H, Yui T F, Lin Q, Ge W C and Sun D Y. 2003a. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis[J]. Lithos, 66: 241-273.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, Lo C H, Yui T F, Lin Q, Ge W C and Sun D Y. 2003b. Highly fractionated I-type granites in NE China (II): Isotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic[J]. Lithos, 67: 191-204.
- Wu F Y, Walker R J, Ren X W, Sun D Y and Zhou X H. 2003c. Osmium isotopic constraints on the age of lithospheric mantle beneath northeastern China[J]. Chemical Geology, 196: 107-129.
- Wu F Y, Walker R J, Yang Y H, Yuan H L and Yang J H. 2006. The chemical-temporal evolution of lithospheric mantle underlying the North China Craton[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 70: 5013-5034.
- Wu G, Li X Z, Xu L Q, Wang G R, Liu J, Zhang T, Quan Z X, Wu H, Li T G, Zeng Q T and Chen Y J. 2017. Age, geochemistry, and Sr-Nd-Hf-Pb isotopes of the Caosiyao porphyry Mo deposit in Inner Mongolia, China[J]. Ore Geology Reviews, 81: 706-727.
- Wu H Y, Zhang L C, Chen Z G, Wan B, Xiang P and Zhang X J. 2010. Hypersaline, high-oxygen fugacity and F-rich fluid inclusions in Jiguanshan porphyry molybdenum deposit, Xilamulun metallogenic belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(5): 1363-1374(in Chinese with English abstract).
- Wyllie P J. 1988. Solidus curves, mantle plumes, and magma generation beneath Hawaii[J]. Journal of Geophysical Research, 93(B5): 4171-4181.
- Xia Q X, Zhi X C, Meng Q, Zheng L and Peng Z C. 2004. The trace element and Re-Os isotopic geochemistry of mantle-derived peridotite xenoliths from Hannuoba: Nature and age of SCLM beneath the area[J]. Acta Petrologica Sinica, 20(5): 1215-1224(in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Windley B F, Hao J and Zhai M G. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt[J]. Tectonics, 22: 1484-1505.
- Xu B and Chen B. 1997. Framework and evolution of the middle Paleozoic orogenic belt between Siberian and North China Plates in northern Inner Mongolia[J]. Science in China (Series D), 40(5): 463-469.
- Xu B, Charvet J, Chen Y, Zhao P and Shi G. 2013. Middle Paleozoic convergent orogenic belts in western Inner Mongolia (China): Framework, kinematics, geochronology and implications for tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt[J]. Gondwana Research, 23(4): 1342-1364.
- Xu B, Zhao P, Wang Y Y, Liao W, Luo Z W, Bao Q Z and Zhou Y H. 2015. The pre-Devonian tectonic framework of Xing 'an-Mongolia orogenic belt (XMOB) in North China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 97: 183-196.
- Xu D Q, Nie F J, Qian M P, Liu Y, Yun F and Zhang W Y. 2009. REE geochemistry and genesis of Sumochagan Obo superlarge fluorite deposit[J]. Mineral Deposits, 28(1): 29-41(in Chinese with English abstract).

English abstract).

- Xu W L , Wang F , Pei F P , Meng E , Tang J , Xu M J and Wang W . 2013. Mesozoic tectonic regimes and regional ore-forming background in NE China : Constraints from spatial and temporal variations of Mesozoic volcanic rock associations[J]. *Acta Petrologica Sinica* , 29(2) : 339-353(in Chinese with English abstract).
- Xu X C , Zhang X X , Zheng C Q , Cui F H , Gao Y and Gao F . 2015. Geochemistry and chronology characteristics of the intrusive rocks and its relationship with mineralization in Yangjiazhangzi area , the western Liaoning Province[J]. *Journal of Jilin University : Earth Science Edition* , 45(3) : 804-819(in Chinese with English abstract).
- Xue J , Nie F J , Dai T G , Peng E S and Liu Y F . 2010. Re-Os isotopic dating of molybdenite from the Aryn nuur Mo deposit in Mongolia and its geological implications[J]. *Acta Geoscientica Sinica* , 31(3) : 350-356(in Chinese with English abstract).
- Yan G H , Mu B L , Xu B L , He G Q , Tan L K , Zhao H and He Z F . 2000. Geochronology and Sr-Nd-Pb isotopic characters of Triassic alkaline intrusions in Yanliao-Yinshan district[J]. *Science in China (Series D)* , 30(4) : 383-387(in Chinese with English abstract).
- Yan G H , Tan L K , Xu B L , Mu B L , Shao H X , Chen T L and Yang B . 2001. Petrogeochemical characteristics of Indosinian Alkaline Intrusions in Yinshan Area[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica* , 20(3) : 281-292(in Chinese with English abstract).
- Yan G H , Mu B L and Xu B L . 2002. Characteristics and implications of Nd , Sr and Pb isotopes and chronology of Phanerozoic alkaline-rich intrusions in North China[J]. *Geological Review* , 48 : 69-76(in Chinese with English abstract).
- Yan G H , Cai J H , Ren K X , He G Q , Mu B L , Xu B L and Yang B . 2007. Intraplate extensional magmatism of North China Craton and break-up of three supercontinents and their deep dynamics[J]. *Geological Journal of China Universities* , 13(2) : 161-174 (in Chinese with English abstract).
- Yang J H , Wu F Y , Chung S L , Wilde S A and Chu M F . 2006. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite , northeast China : Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence[J]. *Lithos* , 89(1) : 89-106.
- Yang J H , Sun J F , Zhang M , Wu F Y and Wilde S A . 2012. Petrogenesis of silica-saturated and silica-undersaturated syenites in the northern North China Craton related to post-collisional and intraplate extension[J]. *Chemical Geology* , 328 : 149-167.
- Yang J H , Wu F Y , Wilde S A , Chen F , Liu X M and Xie L W . 2008. Petrogenesis of an alkali syenite-granite-rhyolite suite in the Yanshan Fold and Thrust Belt , Eastern North China Craton : geochronological , geochemical and Nd-Sr-Hf isotopic evidence for lithospheric thinning[J]. *Journal of Petrology* , 49(2) : 315-351.
- Yang Z H , Wang J P , Liu J J , Wang S G , Wang Q Y , Kang S G , Zhang J X and Zhao Y . 2016. Geochronology and geochemistry of the Wurinitu granites in Inner Mongolia and their geological implications[J]. *Geoscience* , 30(3) : 528-540(in Chinese with English abstract).
- Yang Z M , Chang Z S , Hou Z Q and Meffre S . 2016. Age , igneous petrogenesis , and tectonic setting of the Bilihe gold deposit , China , and implications for regional metallogeny[J]. *Gondwana Research* , 34 : 296-314.
- Zack T , Kronz A , Foley S F and Rivers T . 2002. Trace element abundances in rutiles from eclogites and associated garnet mica schists[J]. *Chemical Geology* , 184 : 97-122.
- Zajacz Z , Halter W E , Pettke T and Guillong M . 2008. Determination of fluid/melt partition coefficients by LA-ICPMS analysis of co-existing fluid and silicate melt inclusions : Controls on element partitioning[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 72 : 2169-2197.
- Zeng Q D , Zhou Z L , Qin F , Cehn W J , Zhang R B , Yu C M and Ye J . 2009. Ore-forming time of the Jiguanshan porphyry molybdenum deposit , northern margin of North China Craton and the Indosinian mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica* , 25(2) : 393-398(in Chinese with English abstract).
- Zeng Q D , Liu J M , Zhang Z L , Chen W J and Zhang W Q . 2011. Geology and geochronology of the Xilamulun molybdenum metallogenic belt in eastern Inner Mongolia , China[J]. *International Journal of Earth Sciences* , 100(8) : 1791-1809.
- Zeng Q D , Liu J M , Chu S X , Wang Y B , Sun Y , Duan X X and Zhou L L . 2012. Mesozoic molybdenum deposits in the East Xingmeng orogenic belt , northeast China : Characteristics and tectonic setting[J]. *International Geology Review* , 54(16) : 1843-1869.
- Zeng Q D , Liu J M , Qin K Z , Fan H , Chu S , Wang , Y and Zhou L . 2013. Types , characteristics , and time-space distribution of molybdenum deposits in China[J]. *International Geology Review* , 55(11) : 1311-1358.
- Zeng Q D , Liu J M , Chu S X , Wang Y B , Sun Y , Duan X X , Zhou L L and Qu W J . 2014. Re-Os and U-Pb geochronology of the Duobaoshan porphyry Cu-Mo(Au) deposit , northeast China , and its geological significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences* , 79 : 895-909.
- Zhai D G , Liu J J , Wang J P , Peng R M , Wang S G , Li Y X and Chang Z Y . 2009. Re-Os isotopic chronology of molybdenite from the Taipinggou porphyry-type molybdenum deposit in Inner Mongolia and its geological significance[J]. *Geoscience* , 23(2) : 262-268 (in Chinese with English abstract).
- Zhai D G , Liu J J , Zhang H Y , Yao M J , Wang J P and Yang Y Q . 2014a. S-Pb isotopic geochemistry , U-Pb and Re-Os geochronology of the Huanggangliang Fe-Sn deposit , Inner Mongolia , NE China[J]. *Ore Geology Reviews* , 59 : 109-122.
- Zhai D G , Liu J J , Wang J P , Yang Y Q , Zhang , H Y , Wang X L ,

- Zhang Q B, Wang G W and Liu Z J. 2014b. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os geochronology, and whole-rock geochemistry of the Hashitu molybdenum deposit and host granitoids, Inner Mongolia, NE China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 144-160.
- Zhai M G and Santosh M. 2011. The early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview [J]. *Gondwana Research*, 20(1): 6-25.
- Zhang C, Li N, Chen Y J and Zhao X C. 2013. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic compositions of the intrusive rocks in the Xing 'a Mo-Cu deposit, Inner Mongolia [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1): 217-230 (in Chinese with English abstract).
- Zhang D Q. 1993. Geological characteristics of the Aonaodaba porphyry tin-polymetallic deposit [J]. *Mineral Deposits*, 12(1): 10-19 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H F, Sun M, Zhou X H, Zhou M F, Fan W M and Zheng J P. 2003. Secular evolution of the lithosphere beneath the eastern North China Craton: Evidence from Mesozoic basalts and high-Mg andesites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(22): 4373-4387.
- Zhang K, Nie F J, Hou W R, Li C and Liu Y. 2012. Re-Os isotopic age dating of molybdenite separates from Hashitu Mo deposit in Linxi County of Inner Mongolia and its geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 31(1): 129-138 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L C, Wu H Y, Wan B and Chen Z G. 2009. Ages and geodynamic settings of Xilamulun Mo-Cu metallogenic belt in the northern part of the North China Craton [J]. *Gondwana Research*, 16(2): 243-254.
- Zhang L L, Liu C, Zhou S, Sun K, Qiu R Z and Feng Y. 2014. Characteristics of ore-bearing granites and ore-forming age of the Huojihe molybdenum deposit in Lesser Xing 'an Range [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11): 3419-3431 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L, Audétat A and Dolejš D. 2012. Solubility of molybdenite (MoS₂) in aqueous fluids at 600~800°C, 200 MPa: A synthetic fluid inclusion study [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 77: 175-185.
- Zhang S H, Zhao Y, Song B and Yang Z Y, Hu J M and Wu H. 2007a. Carboniferous granitic plutons from the northern margin of the North China block: Implications for a late Palaeozoic active continental margin [J]. *Journal of the Geological Society*, 164: 451-463.
- Zhang S H, Zhao Y, Song B and Liu D Y. 2007b. Petrogenesis of the Middle Devonian Gushan diorite pluton on the northern margin of the North China block and its tectonic implications [J]. *Geological Magazine*, 144(3): 553-568.
- Zhang S, Kou L L, Han R P, Liu G X, Pang W L, Lü J C and Tan H Y. 2013. Metallogeny and zircon U-Pb age of ore-bearing granodiorite of the Huojihe molybdenum deposit in Heilongjiang Province [J]. *Geology and Resources*, 22(3): 169-173 (in Chinese with English abstract).
- Zhang T, Chen Z Y, Xu L Q and Chen Z H. 2009. The Re-Os isotopic dating of molybdenite from the Dasuji molybdenum deposit in Zhuozhi County of Inner Mongolia and its geological significance [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 28(3): 279-283 (in Chinese with English abstract).
- Zhang W Y, Nie F J, Liu Y, Jiang S H, Xu Z, Hu P and Pi X D. 2007. Studies on sulfur and lead isotope of the Arehada Pb-Zn-Ag deposit, Dong Ujimqin Qi (County), Inner Mongolia [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 37(5): 868-883 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y, Sun J G, Xing S W, Zhao K Q, Wang Y, Qiu D M, Liu S Y and Chen M. 2014. Diagenetic and metallogenic geochronology and geochemical characteristics of the Sifangdianzi molybdenum deposit in Jilin Province [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 44(6): 1869-1883 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z L, Zeng Q D, Qu W J, Liu J M, Sun X G, Zhang R B, Chen W J and Qin F. 2009. The molybdenite Re-Os dating from the Ni-anzigou Mo deposit, Inner Mongolia and its geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 212-218 (in Chinese with English abstract).
- Zhao G C, Cawood P A, Li S, Wilde S A, Sun M, Zhang J, He Y H and Yin C Q. 2012. Amalgamation of the North China Craton: Key issues and discussion [J]. *Precambrian Research*, 222: 55-76.
- Zhao P, Jahn B M, Xu B, Liao W and Wang Y Y. 2016. Geochemistry, geochronology and zircon Hf isotopic study of peralkaline-alkaline intrusions along the northern margin of the North China Craton and its tectonic implication for the southeastern Central Asian Orogenic Belt [J]. *Lithos*, 261(2016): 92-108.
- Zhao Y, Chen B, Zhang S H, Liu J M, Hu J M, Liu J and Pei J L. 2010. Pre-Yanshanian geological events in the northern margin of the North China Craton and its adjacent areas [J]. *Chemical Geology*, 37(4): 900-915 (in Chinese with English abstract).
- Zhi X C, Song Y, Frey F A, Feng J and Zhai M. 1990. Geochemistry of Hannuoba basalts, eastern China: Constraints on the origin of continental alkalic and tholeiitic basalt [J]. *Chemical Geology*, 88(1): 1-33.
- Zhou X H, Zhang G H, Yang J H, Chen W J and Sun M. 2001. Sr-Nd-Pb isotope mapping of late Mesozoic volcanic rocks across northern margin of North China Craton and implications to geodynamic processes [J]. *Geochimica*, 30(1): 10-23 (in Chinese with English abstract).
- Zhou X H, Sun M, Zhang G H and Chen S H. 2002. Continental crust and lithospheric mantle interaction beneath North China: Isotopic evidence from granulite xenoliths in Hannuoba, Sino-Korean

- crator[J]. *Lithos*, 62: 111-124.
- Zhou X H. 2009. Major transformation of subcontinental lithosphere beneath North China in Cenozoic-Mesozoic: Revisited[J]. *Geological Journal of China Universities*, 15(1): 1-18 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Z H, Lü S L and Wang A S. 2011. Deep source characteristics and tectonic-magmatic evolution of granites in the Huanggang Sn-Fe deposit, Inner Mongolia: Constraint from Sr-Nd-Pb-Hf multiple isotopes[J]. *Geological Science and Technology Information*, 30(1): 1-14 (in Chinese with English abstract).
- Zhu X Y, Huang L, Wang J W and Wu X G. 2005. A new idea of the ore-controlling structure in the Liqingdi lead-zinc-silver deposit, Inner Mongolia, and breakthrough in mineral exploration[J]. *Chemical Geology*, 32(4): 641-647 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 蔡明海, 张志刚, 屈文俊, 彭振安, 张诗启, 徐明, 陈艳, 王显彬. 2011a. 内蒙古乌拉特后旗查干花钼矿床地质特征及 Re-Os 测年[J]. *地球学报*, 32(1): 64-68.
- 蔡明海, 张志刚, 屈文俊, 钟银钊, 冯罡, 张诗启, 徐明, 陈艳. 2011b. 内蒙古乌拉特后旗查干德尔斯钼矿床地质特征及 Re-Os 测年[J]. *矿床地质*, 30(3): 377-384.
- 陈伟军, 刘建明, 刘红涛, 孙兴国, 张瑞斌, 张作伦, 覃锋. 2010. 内蒙古鸡冠山斑岩钼矿床成矿时代和成矿流体研究[J]. *岩石学报*, (5): 1423-1436.
- 陈衍景, 张成, 李诺, 杨永飞, 邓軻. 2012. 中国东北钼矿床地质[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42(5): 1223-1268.
- 陈志广, 张连昌, 吴华英, 等. 2008. 内蒙古西拉木伦成矿带碾子沟钼矿区 A 型花岗岩地球化学和构造背景[J]. *岩石学报*, 24(4): 879-889.
- 褚少雄, 曾庆栋, 刘建明, 张伟庆, 张作伦, 张松, 汪在聪. 2010. 西拉木伦钼矿带车户沟斑岩型钼-铜矿床成矿流体特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 26(8): 2465-2481.
- 段焕春, 秦正永, 林晓辉, 张宝华, 刘学武, 张晓, 郭鹏志, 韩芳, 秦磊, 代军治. 2007. 河北丰宁县大草坪钼矿区岩体锆石 U-Pb 年龄研究[J]. *矿床地质*, 26(6): 634-642.
- 高山, Rudnick R L, Carlson R W, McDonough W F, 刘勇胜. 2003. 华北克拉通岩石圈地幔置换作用和壳幔生长耦合的 Re-Os 同位素证据[J]. *地学前缘*, 10(3): 61-67.
- 郝宇杰, 任云生, 赵华雷, 邹欣桐, 陈聪, 侯召硕, 屈文俊. 2013. 黑龙江省翠宏山钨钼多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 43(6): 1840-1850.
- 侯万荣, 聂凤军, 杜安道, 李超, 江思宏, 白大明, 刘妍. 2010a. 内蒙古西沙德盖钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. *矿床地质*, 29(6): 1043-1054.
- 侯万荣, 聂凤军, 江思宏, 白大明, 刘妍, 云飞, 刘翼飞. 2010b. 蒙古国查干苏布尔加大型铜-钼矿床地质特征及成因[J]. *地球学报*, 31(3): 307-320.
- 侯增谦, 郑远川, 耿元生. 2015. 克拉通边缘岩石圈金属再富集与金-钼-稀土元素成矿作用[J]. *矿床地质*, 34(4): 641-674.
- 胡新露, 药书振, 何某春, 丁振举, 刘明, 崔玉宝, 沈军. 2014. 大兴安岭北段岔路口和大黑山斑岩型钼矿床硫、铅同位素特征[J]. *矿床地质*, 33(4): 776-784.
- 黄典豪, 杜安道, 吴澄宇, 刘兰笙, 孙亚莉, 邹晓秋. 1996. 华北地台北钼(铜)矿床成矿年代学研究: 辉钼矿铼-钨年龄及其地质意义[J]. *矿床地质*, 15(4): 365-373.
- 黄凡, 王登红, 王平安, 王成辉, 刘善宝, 刘翠辉, 谢有炜, 郑兵华, 李松柏. 2014. 大兴安岭北段宜里钼岩石成因及成岩成矿年代学[J]. *地质学报*, 88(3): 361-379.
- 江思宏, 聂凤军, 白大明, 刘翼飞, 刘妍. 2011. 内蒙古白音诺尔铅锌矿床印支期成矿的年代学证据[J]. *矿床地质*, 30(5): 787-798.
- 金露英, 秦克章, 孟昭君, 李光明, 宋国学, 李真真, 吕克鹏, 阚学胜, 赵超. 2014. 大兴安岭北段岔路口巨型钼(钨)矿床脉体特征、产状及其对成矿的指示[J]. *矿床地质*, 33(4): 742-760.
- 金露英, 秦克章, 李光明, 李真真, 宋国学, 孟昭君. 2015. 大兴安岭北段岔路口斑岩 Mo-热液脉状 Zn-Pb 成矿系统硫化物微量元素分布、起源及其勘探指示[J]. *岩石学报*, 31(8): 2417-2434.
- 鞠楠, 任云生, 王超, 王辉, 赵华雷, 屈文俊. 2012. 吉林敦化大石河钼矿床成因与辉钼矿 Re-Os 同位素测年[J]. *世界地质*, 31(1): 68-76.
- 李俊建, 唐文龙, 付超, 李超, 屈文俊, 张彤, 王守光, 党智财, 周勇, 赵丽君. 2016. 内蒙古阿巴嘎旗比鲁干斑岩型钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. *地质通报*, 35(4): 519-523.
- 李立兴, 松权衡, 王登红, 王成辉, 屈文俊, 汪志刚, 毕守业, 于城. 2009. 吉林福安堡钼矿中辉钼矿铼-钨同位素定年及成矿作用探讨[J]. *岩矿测试*, 28(3): 283-287.
- 林强, 葛文春, 曹林, 孙德有, 林经国. 2003. 大兴安岭中生代双峰式火山岩的地球化学特征[J]. *地球化学*, 32(3): 208-222.
- 刘万臻, 孙丰月, 黄维平, 王琳琳, 苏斌, 桓凤明. 2014. 吉林福安堡棒子山花岗岩锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学特征及其地质意义[J]. *世界地质*, 33(2): 290-298.
- 刘晓林, 范平, 郑志丰, 李爱莉. 2009. 辽西杨家杖子-八家子钼多金属成矿带 典型钼矿床特征及找矿远景预测[J]. *地质与资源*, 18(2): 110-115.
- 刘翼飞, 聂凤军, 江思宏, 薛静, 侯万荣, 云飞. 2010. 蒙古国阿林诺尔钼矿床赋矿花岗岩年代学及地球化学特征[J]. *地球学报*, 31(3): 343-349.
- 刘翼飞, 聂凤军, 孙振江, 吕克鹏, 张可, 刘勇. 2011a. 岔路口特大型钼多金属矿床的发现及其意义[J]. *矿床地质*, 30(4): 759-

764.

- 刘翼飞, 聂凤军, 江思宏, 席忠, 张志刚, 肖伟, 张可, 刘勇. 2011b. 内蒙古查干花钼矿床矿流体特征及矿床成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 41(6): 1794-1805.
- 刘翼飞, 聂凤军, 江思宏, 席忠, 张志刚, 肖伟, 张可, 刘勇. 2012a. 内蒙古查干花钼矿区成矿花岗岩地球化学、年代学及成岩作用[J]. 岩石学报, 28(2): 409-420.
- 刘翼飞, 聂凤军, 江思宏, 侯万荣, 梁清玲, 张可, 刘勇. 2012b. 内蒙古苏尼特左旗准苏吉花钼矿床成岩成矿年代学及其地质意义[J]. 矿床地质, 31(1): 119-128.
- 刘翼飞, 樊志勇, 蒋胡灿, 聂凤军, 江思宏, 丁成武, 王丰翔. 2014. 内蒙古维拉斯托-拜仁达坝斑岩-热液脉状成矿体系研究[J]. 地质学报, 88(12): 2373-2385.
- 刘勇, 聂凤军, 刘翼飞, 侯万荣. 2012. 内蒙古宝格达乌拉钼(钨)矿区花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义[J]. 岩石学报, 28(2): 401-408.
- 刘玉强. 1996. 内蒙古毛登锡铜矿床地质及成因[J]. 矿床地质, 15(2): 133-143.
- 卢志强, 李绪俊, 秋晨, 梁本胜. 2016. 吉林中东部季德屯钼矿床含矿岩体地质、地球化学及年代学研究[J]. 矿床地质, 35(2): 349-364.
- 骆文娟, 张德会, 孙剑. 2010. 河北丰宁撒岱沟门钼矿区成矿岩体地球化学特征及其对矿床成因的约束[J]. 地质与勘探, 46(3): 491-505.
- 马星华, 陈斌, 赖勇, 鲁颖淮. 2009. 内蒙古敖伦花斑岩钼矿床成岩成矿年代学及地质意义[J]. 岩石学报, 25(11): 2939-2950.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. 岩石学报, 21(1): 169-188.
- 毛景文, 程彦博, 郭春丽, 杨宗喜, 冯佳睿. 2008. 云南个旧锡矿田: 矿床模型及若干问题讨论[J]. 地质学报, 82(11): 1455-1467.
- 孟庆丰, 于晓飞, 郑伟. 2016. 吉林季德屯钼矿区石英二长岩 SIMS 锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其成因[J]. 地质学报, 90(5): 917-932.
- 牟保磊, 阎国翰. 1992. 燕辽三叠纪碱性偏碱性杂岩体地球化学特征及意义[J]. 地质学报, 66(2): 108-121.
- 聂凤军, 温银维, 赵元艺, 姜美义, 江思宏, 张万益. 2007a. 内蒙古白音查干钨多金属矿化区地质特征及找矿方向[J]. 矿床地质, 26(2): 213-220.
- 聂凤军, 张万益, 杜安道, 江思宏, 刘妍. 2007b. 内蒙古小东沟斑岩型钼矿床辉钼矿铼-钨同位素年龄及地质意义[J]. 地质学报, 81(7): 898-905.
- 聂凤军, 孙振江, 李超, 刘翼飞, 吕克鹏, 张可, 刘勇. 2011. 黑龙江岔路口钨多金属矿床辉钼矿铼-钨同位素年龄及地质意义[J]. 矿床地质, 30(5): 828-836.
- 聂凤军, 李香资, 李超, 等. 2013. 内蒙古兴和县曹四夭特大型钼矿床辉钼矿铼-钨同位素年龄及地质意义[J]. 地质论评, 59(1): 175-181.
- 牛晓露, 杨经绥, 刘飞, 张红雨, 杨明春. 2016. 华北克拉通北缘包头东正长岩的成因: 来自岩石矿物学和地球化学的证据[J]. 中国科学: 地球科学, 46: 374-391.
- 覃锋, 刘建明, 曾庆栋, 罗照华. 2009. 内蒙古克什克腾旗小东沟斑岩型钼矿床成岩成矿机制探讨[J]. 岩石学报, 25(12): 3357-3368.
- 任康绪, 阎国翰, 牟保磊, 蔡剑辉, 李凤棠, 谭林坤, 邵宏翔, 李元●, 储著银. 2004. 辽西凌源河坎子碱性杂岩体地球化学特征及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 23(3): 193-202.
- 任荣, 牟保磊, 韩宝福, 张磊, 陈家富, 徐钊, 宋彪. 2009. 河北矾山钾质碱性超镁铁岩-正长岩杂岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄[J]. 岩石学报, 25(3): 588-594.
- 邵建波. 2014. 吉林中东部季德屯和大石河大型钼矿床流体包裹体特征及地质意义[J]. 世界地质, 33(4): 794-807.
- 石玉若, 刘敦一, 张旗, 简平, 张福勤, 苗来成, 张履桥. 2007. 内蒙古中部苏尼特左旗地区三叠纪 A 型花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其区域构造意义[J]. 地质通报, 26(2): 183-189.
- 孙金龙, 任云生, 杨玉山, 王强, 刘剑波, 张金江, 聂卫东, 王爱臣, 屈文俊. 2016. 冀东太平村钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素测年及其地质意义[J]. 世界地质, 35(3): 738-751.
- 孙庆龙, 孙景贵, 赵克强, 唐臣, 张勇, 韩世炯, 杨帆. 2014. 黑龙江鹿鸣斑岩型钼矿床 Re-Os 同位素定年及其地质意义[J]. 世界地质, 33(2): 1-8.
- 孙卫东, 李聪颖, 凌明星, 丁兴, 杨晓勇, 梁华英, 张红, 范蔚茗. 2015. 钼的地球化学性质与成矿[J]. 岩石学报, 31(7): 1807-1811.
- 谭红艳, 舒广龙, 吕骏超, 韩仁萍, 张森, 寇林林. 2012. 小兴安岭鹿鸣大型钼矿 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(6): 1757-1770.
- 汤艳杰, 张宏福, 英基丰. 2014. 阴山及邻区三叠纪富碱侵入岩的成因意义[J]. 岩石学报, 30(7): 2031-2040.
- 陶继雄, 王●, 陈郑辉, 罗忠泽, 许立权, 郝先义, 崔来旺. 2009. 内蒙古苏尼特左旗乌兰德勒钼铜多金属矿床辉钼矿铼-钨同位素定年及其地质特征[J]. 岩矿测试, 28(3): 249-253.
- 童英, 洪大卫, 王涛, 等. 2010. 中蒙边境中段花岗岩时空分布特征及构造和找矿意义[J]. 地球学报, 31(3): 395-412.
- 王成辉, 松权衡, 王登红, 李立兴, 于城, 汪志刚, 屈文俊, 杜安道, 应立娟. 2009. 吉林大黑山超大型钼矿辉钼矿铼-钨同位素定年及其地质意义[J]. 岩矿测试, 28(3): 269-273.
- 王辉, 任云生, 赵华雷, 鞠楠, 屈文俊. 2011. 吉林安图刘生店钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其地质意义[J]. 地球学报, 32(6): 707-715.
- 王荃, 刘雪亚, 李锦秩. 1991. 内蒙古中部中朝与西伯利亚古板块间缝合线的确定[J]. 中国地质科学院院报, 22: 1-15.
- 王召林, 金浚, 李占龙, 刘焘. 2014. 大兴安岭中北段太平川斑岩钼(铜)矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及地质意义[J]. 矿床地质, 增刊: 45-46.

- 吴华英,张连昌,陈志广,万博,相鹏,张晓静. 2010. 西拉木伦多金属成矿带鸡冠山斑岩钼矿富氟高盐度高氧逸度流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 26(5): 1363-1374.
- 夏琼霞,支霞臣,孟庆,郑磊,彭子成. 2004. 汉诺坝幔源橄榄岩包裹体的微量元素和 Re-Os 同位素地球化学: SCLM 的性质和形成时代[J]. 岩石学报, 20(5): 1215-1224.
- 徐学纯,张行行,郑常青,崔芳华,高原,高峰. 2015. 辽西杨家杖子侵入岩地球化学和年代学特征及其与成矿的关系[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 45(3): 804-819.
- 许东青,聂凤军,钱明平,刘妍,云飞,张万益. 2009. 苏莫查干敖包超大型萤石矿床的稀土元素地球化学特征及其成因意义[J]. 矿床地质, 28(1): 29-41.
- 许文良,王枫,裴福萍,孟恩,唐杰,徐美君,王伟. 2013. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景: 来自中生代火山岩组合时空变化的制约[J]. 岩石学报, 29(2): 339-353.
- 薛静,聂凤军,戴塔根,彭恩生,刘翼飞. 2010. 蒙古国阿林诺尔钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及地质意义[J]. 地球学报, 31(3): 350-356.
- 阎国翰,牟保磊,许保良,何国琦,谭林坤,赵晖,何中南. 2000. 燕辽-阴山三叠纪碱性侵入岩年代学和 Sr-Nd-Pb 同位素特征及意义[J]. 中国科学(D辑), 30(4): 383-387.
- 阎国翰,谭林坤,许保良,牟保磊,邵宏翔,陈廷礼,童英,任康绪,杨斌. 2001. 阴山地区印支期碱性侵入岩岩石地球化学特征[J]. 岩石矿物学杂志, 20(3): 281-292.
- 阎国翰,牟保磊,许保良,等. 2002. 中国北方显生宙富碱侵入岩年代学和 Nd, Sr, Pb 同位素特征及其意义[J]. 地质论评, 48(s1): 69-76.
- 阎国翰,蔡剑辉,任康绪,何国琦,牟保磊,许保良,李凤棠,杨斌. 2007. 华北克拉通板内拉张性岩浆作用与三个超大陆裂解及深部地球动力学[J]. 高校地质学报, 13(2): 161-174.
- 杨增海,王建平,刘家军,王守光,王清义,康书光,张捷先,赵云. 2016. 内蒙古乌日尼图花岗岩的年代学、地球化学及其地质意义[J]. 现代地质, 30(3): 528-540.
- 曾庆栋,刘建明,张作伦,覃锋,陈伟军,张瑞斌,于昌明,叶杰. 2009. 华北克拉通北缘鸡冠山斑岩钼矿床成矿年代及印支期成矿事件[J]. 岩石学报, 25(2): 393-398.
- 翟德高,刘家军,王建平,彭润民,王守光,李玉玺,常忠耀. 2009. 内蒙古太平沟斑岩型钼矿床 Re-Os 等时线年龄及其地质意义[J]. 现代地质, 23(2): 262-268.
- 张成,李诺,陈衍景,赵希诚. 2013. 内蒙古兴阿钼铜矿区侵入岩锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素组成[J]. 岩石学报, 29(1): 217-230.
- 张德全. 1993. 敖瑞达巴斑岩型锡多金属矿床地质特征[J]. 矿床地质, 12(1): 10-19.
- 张可,聂凤军,侯万荣,李超,刘勇. 2012. 内蒙古林西县哈什吐钼矿床辉钼矿铍年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 31(1): 129-138.
- 张琳琳,刘翠,周肃,孙凯,邱瑞照,冯瑶. 2014. 小兴安岭霍吉河钼矿区含矿花岗岩类特征及成矿年龄[J]. 岩石学报, 30(11): 3419-3431.
- 张森,寇林林,韩仁萍,刘桂香,庞文龙,吕俊超,谭红艳. 2013. 黑龙江省霍吉河钼矿成矿特征及赋矿花岗岩闪长岩锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质与资源, 22(3): 169-173.
- 张彤,陈志勇,许立权,陈郑辉. 2009. 内蒙古卓资县大苏计钼矿辉钼矿铍-钨同位素定年及其地质意义[J]. 岩矿测试, 28(3): 279-282.
- 张万益,聂凤军,刘妍,江思宏,徐智,胡朋,皮晓东. 2007. 内蒙古东乌旗阿尔哈达铅-锌-银矿床硫和铅同位素研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 37(5): 868-877.
- 张勇,孙景贵,邢树文,赵克强,王岩,邱殿明,刘思宇,陈明. 2014. 吉林四方甸子钼矿床成岩成矿时代及岩石地球化学特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 44(6): 1869-1882.
- 张作伦,曾庆栋,屈文俊,刘建明,孙兴国,张瑞斌,陈伟军,覃锋. 2009. 内蒙碾子沟钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 25(1): 212-218.
- 赵越,陈斌,张拴宏,刘建民,胡健民,刘健,裴军令. 2010. 华北克拉通北缘及邻区前燕山期主要地质事件[J]. 中国地质, 37(4): 900-915.
- 周新华,张国辉,杨进辉,陈文寄,孙敏. 2001. 华北克拉通北缘晚中生代火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素填图及其构造意义[J]. 地球化学, 30(1): 10-23.
- 周新华. 2009. 华北中-新生代大陆岩石圈转型的研究现状与方向——兼评“岩石圈减薄”和“克拉通破坏”[J]. 高校地质学报, 15(1): 01-18.
- 周振华,吕林素,王挨顺. 2011. 内蒙古黄岗锡铁矿床花岗岩深部源区特征与构造岩浆演化 Sr-Nd-Pb-Hf 多元同位素制约[J]. 地质科技情报, 30(1): 1-14.
- 祝新友,黄琳,王金娃,吴晓光. 2005. 内蒙古李清地铅锌银矿控矿构造的新认识与找矿突破[J]. 中国地质, 32(4): 641-647.