

doi: 10.12029/gc20220208

唐文龙,付超,李俊建,彭翼,宋立军,张彤,侯占国,党智财. 2022. 华北地区钼矿资源特征及成矿规律研究[J]. 中国地质, 49(2): 455-471.
Tang Wenlong, Fu Chao, Li Junjian, Peng Yi, Song Lijun, Zhang Tong, Hou Zhanguo, Dang Zhicai. 2022. Resources characteristics of molybdenum deposits and their regional metallogeny regularity in North China[J]. Geology in China, 49(2): 455-471(in Chinese with English abstract).

华北地区钼矿资源特征及成矿规律研究

唐文龙^{1,2}, 付超^{1,2}, 李俊建^{1,2}, 彭翼³, 宋立军⁴, 张彤⁵, 侯占国⁶, 党智财^{1,2}

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 华北地质科技创新中心, 天津 300170; 3. 河南省地质调查院, 河南 郑州 450007; 4. 河北省地质调查院, 河北 石家庄 050081; 5. 内蒙古自治区地质调查院, 内蒙古 呼和浩特 010020; 6. 山西省地质调查院, 山西 太原 030006)

摘要:【研究目的】钼(Mo)作为战略性矿产资源,查明华北地区钼矿资源,总结成矿规律,提出找矿方向,对研究区钼矿勘查部署具有重要意义。【研究方法】本文以研究区 98 处钼矿床(点)资料为基础,通过对钼矿资源禀赋、成矿特征、预测类型的梳理,系统剖析与总结对研究区钼矿床成矿时空规律、物质来源、控矿要素等,进而分析资源潜力,提出找矿方向。【研究结果】华北地区钼矿可以划分为 4 种成矿类型和 4 种预测类型,总结了钼矿成矿规律,提出了找矿方向。【结论】钼矿床成矿时代主要集中于古元古代、二叠纪—三叠纪和侏罗纪—白垩纪,并以侏罗纪—白垩纪为最主要的成矿时期,古元古代豫陕陆缘裂谷带,晚古生代—早中生代华北陆块南、北缘陆缘活动带和晚中生代岩浆弧是钼矿床主要产出部位,成矿类型以斑岩型、矽卡型为主,成矿物质主要来源于壳源或壳幔混源,成矿流体以岩浆水为主,并有后期天水混入,提出了华北陆块北缘西段河北平泉—内蒙赤峰—凉城一带、东秦岭—大别汝阳—嵩县—栾川一带和黑鹰山—亚干地区成矿条件优越,找矿潜力巨大。

关键词:钼矿;成矿规律;预测类型;华北地区;矿产勘查工程

创新点:系统梳理了华北地区钼矿资源禀赋,总结了钼矿床时空规律、成矿物质来源及控矿要素,提出了明确的找矿方向,为华北地区钼矿资源勘查部署提供了技术及资料支持。

中图分类号: P618.65 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)02-0455-17

Resources characteristics of molybdenum deposits and their regional metallogeny regularity in North China

TANG Wenlong^{1,2}, FU Chao^{1,2}, LI Junjian^{1,2}, PENG Yi³, SONG Lijun⁴,
ZHANG Tong⁵, HOU Zhanguo⁶, DANG Zhicai^{1,2}

(1. Tianjin Center, China Geology Survey (CGS), Tianjin, 300170, China; 2. North China Center of Geoscience Innovation, Tianjin, 300170; 3. Henan Institute of Geological Survey, Zhengzhou 450007, Henan, China; 4. Hebei Institute of Geological Survey, Shijiazhuang 050081 Hebei, China; 5. Inner Mongolia Institute of Geological Survey, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China; 6. Shanxi Institute of Geological Survey, Taiyuan 030006, Shanxi, China)

收稿日期: 2020-03-15; 改回日期: 2022-03-16

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190379-31、1212011121029、200110200038)及国家重点研发项目(2016YFC0600107、2018YFC0603805-1)联合资助。

作者简介: 唐文龙,男,1979年生,高级工程师,主要从事矿产勘查及成矿作用研究;E-mail: twl011562@126.com。

通讯作者: 付超,男,1986年生,高级工程师,主要从事地质调查和成矿规律研究;E-mail: fuchaocugb@163.com。

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] Molybdenum (Mo) is a strategic mineral resource. It is of great significance to identify molybdenum ore resources in North China, summarize the metallogenic laws, and put forward the prospecting direction, which is of great significance for the exploration and deployment of molybdenum ore in the study area. **[Methods]** Based on the data of 98 molybdenum deposits, the authors systematically analyzed and summarized the metallogenic epoch regularities, spatial regularities, material sources and ore-controlling factors in the study area through combing the resources endowment, metallogenic characteristics and prediction types of molybdenum deposits, then analyzed the resource potential and put forward the prospecting direction. **[Results]** Molybdenum deposits in North China could be divided into four metallogenic types and four mineral prediction types. The metallogenic regularities of molybdenum deposits had been summarized and the prospecting direction is proposed. **[Conclusions]** We thought the metallogenic age mainly concentrated in the Paleoproterozoic, the Permian-Triassic and Jurassic-Cretaceous, and the later was the major metallogenic epoch. The molybdenum deposits mainly produced in Paleoproterozoic Henan-Shanxi continental margin rift zone, late Paleozoic-early Mesozoic continental margin active zone in the south and north of North China block and the late Mesozoic magmatic arc, which the main metallogenic types were porphyry type and skarn type. The ore-forming materials were mainly come from crust-source or crust-mantle mixed source, and the ore-forming fluids were dominated by magmatic water, which were mixed with atmospheric water in the late stage. We pointed out three the most important areas as superior ore-forming conditions and great ore-prospecting potential like Pingquan, Hebei Province-Chifeng-Liangcheng in Inner Mongolia, the western segment of the northern margin of the North China block and Ruyang-Songxian-Luanchuan area in east Qinling-Dabie belt and Heiyingshan-Yagan area.

Key words: molybdenum deposits; regional metallogeny; predictions types, North China; mineral exploration engineering

Highlights: The authors systematically analyzed the molybdenum resource endowment in North China, summarized the epoch and spatial regularities of molybdenum deposits, the source of metallogenic materials and ore-controlling factors, put forward prospecting direction, which provides technical and data support for the exploration and deployment of geological molybdenum resources in North China.

About the first author: TANG Wenlong, male, born in 1979, senior engineer, engaged in mineral exploration and research progress in metallogenesis; E-mail: twl011562@126.com.

About the corresponding author: FU Chao, male, born in 1986, senior engineer, engaged in geological survey and metallogenic regularity research; E-mail: fuchaocugb@163.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No. DD20190379-31, No. 1212011121029, No. 200110200038) and National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0600107, No. 2018YFC0603805-1).

1 引 言

钼作为一种稀有金属以其独特的性能,被广泛应用于钢铁、电子、有色、航空、化工以及核工业等领域,素有“能源金属”、“战争金属”之称。最新研究发现,钼在半导体材料中显示出了优良的特性,在新兴材料领域表现出强劲的优势。一直以来,钼作为战略性矿产资源,在中国国民经济中均占有重要地位,被列入全国矿产资源规划中(全国矿产资源规划(2016—2020))。

华北地区横跨华北克拉通、秦祁昆造山系、天山—兴蒙造山系、塔里木陆块4大I级构造单元,先后经历了陆核形成、二次克拉通化事件、扬子板块与华

北板块碰撞造山事件、古亚洲洋俯冲闭合事件以及太平洋板块俯冲事件等,多期次的构造岩浆活动带来了丰富的钼矿资源,形成了东秦岭—大别、华北陆块北缘、大兴安岭中南段和黑鹰山—亚干等钼成矿带,成为中国最主要的钼矿资源基地(Mao et al., 2008, 2011a, b; Shu et al., 2014)。前人主要针对该区斑岩型、矽卡岩型钼矿床就矿床特征、成矿时代、流体包裹体、矿床成因、成矿机制等进行了大量的研究(Mao et al., 2008, 2011a, b; 丁正江等, 2012; Yang et al., 2012a; Gao et al., 2013; Chen et al., 2014; 李正远等, 2014; Shu et al., 2014; Zhai et al., 2014; Liu et al., 2017; Zhang et al., 2018a; Zhang et al., 2019; 李怀坤等, 2020; 王智等, 2020; 相振群等, 2020; 张家辉等,

2020),并提出以下认识:(1)钼矿床成矿时代主要集中于晚古生代—三叠纪、印支期和燕山期,其中燕山期最为重要;(2)陆陆碰撞背景下,挤压—伸展过渡时期的斑岩体系形成的流体包裹体以富CO₂流体为特征,而洋陆碰撞背景下,火山弧岩体中形成的流体包裹体以贫CO₂流体为特征;(3)巨量钼主要来源于地壳,并有少量幔源物质参与。众多学者大量的研究工作主要集中于典型矿床的深入剖析,而对区域成矿规律的总结尚未深入。近年来,一系列大、中型钼矿床的发现(高阳等,2010;蔡明海等,2011a;张雨莲等,2012;李俊建等,2016a,b;Zhou et al.,2019;),为华北地区钼矿勘查注入了新的活力,对全区钼矿床成矿特征、控矿要素、区域成矿规律等进行梳理与总结提出了新的要求。本次利用华北地区矿产资源潜力评价项目^{①②③}统计的98处钼矿床(点)资料进行认真分析,初步总结了研究区钼矿资源特征及成矿规律,以期为该区域钼矿资源勘查部署和资源潜力分析提供依据。

2 资源特征

截至2016年,华北地区钼矿探明资源总量达1200万t(全国矿产资源储量通报,2016),共发现钼矿床(点)235个,其中,河南省钼矿资源位居全国第一,已发现矿床(点)95处,内蒙古紧随其后,已发现矿床(点)82处;河北省已发现31处;山东省发现7处;山西省已发现的12处钼矿床以中小型为主;北京市钼矿分布零散,发现矿床(点)8处。相较于2015年,全区钼矿资源储量呈下降趋势,河南、内蒙、河北均有降低(图1),其中河南省降低最多,2016年比2015年减少了49.22万t。

近年来,华北地区主要钼矿带内先后取得了多

处找矿突破,其中,河南省发现嵩县雷门沟超大型斑岩型钼矿床、前范岭大型石英脉型钼矿、温泉斑岩型钼矿等3处;内蒙古发现曹四夭超大型斑岩型钼矿床、迪彦钦阿木超大型斑岩型钼矿、查干花大型斑岩型钼矿、毕鲁干甘中型斑岩型钼矿等4处;河北省发现柴家沟大型斑岩型钼矿、太阳沟斑岩型钼矿、太平村大型斑岩型钼矿等3处;山西省灵丘县发现古道沟钼矿。而新发现的钼矿床中,除以燕山期斑岩型钼矿为主外,还包括有新成矿时代、新成矿类型等一系列大中型钼矿床,既为该区域钼矿勘查提出的新的方向,同时也显示出了华北地区钼矿仍存在着巨大的找矿潜力。

3 钼矿床类型及特征

3.1 钼矿床成因类型

华北地区钼矿床成矿类型多样,大体可以划分为热液型和沉积变质型,而热液型又可细分为斑岩型、接触交代型和热液脉型(图2),其中以斑岩型和接触交代型为主,超大型和大型钼矿几乎均为这两种类型(李俊建等,2013),热液脉型钼矿床以含矿石英脉为主,成矿规模相对有限,而近年来前范岭大型石英脉型钼矿的发现,打破了以往热液脉型钼矿不成大矿的观点。沉积变质型钼矿在研究区分布有限,目前仅在内蒙古阿拉善地区发现了1处。

3.1.1 斑岩型钼矿

斑岩型钼矿为华北地区最重要的钼矿类型,全区有斑岩型钼矿产地48处,其中大型及以上8处,中型14处,小型9处,矿点17处。矿床通常与印支期—燕山期中酸性侵入岩体密切相关,岩性主要有花岗闪长斑岩、花岗斑岩、似斑状花岗岩、石英闪长斑岩、二长斑岩和花岗闪长岩等。无论是酸性斑岩

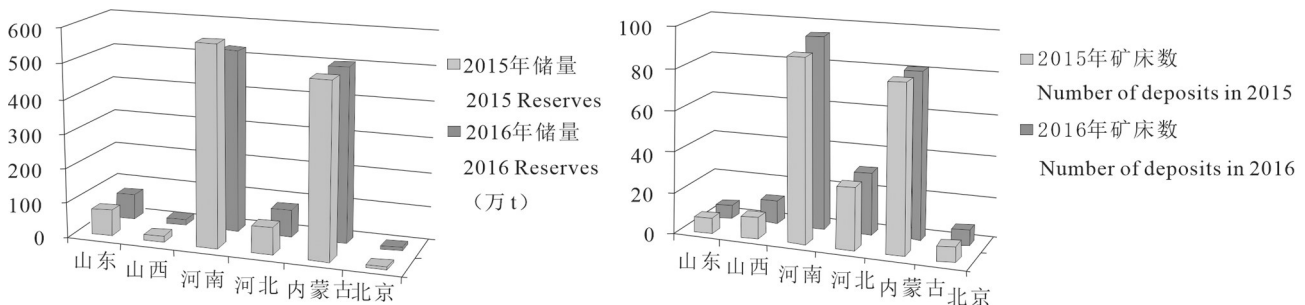


图1 华北地区各省份钼矿床储量及矿床数量

Fig.1 Reserves and numbers of molybdenum deposits in North China

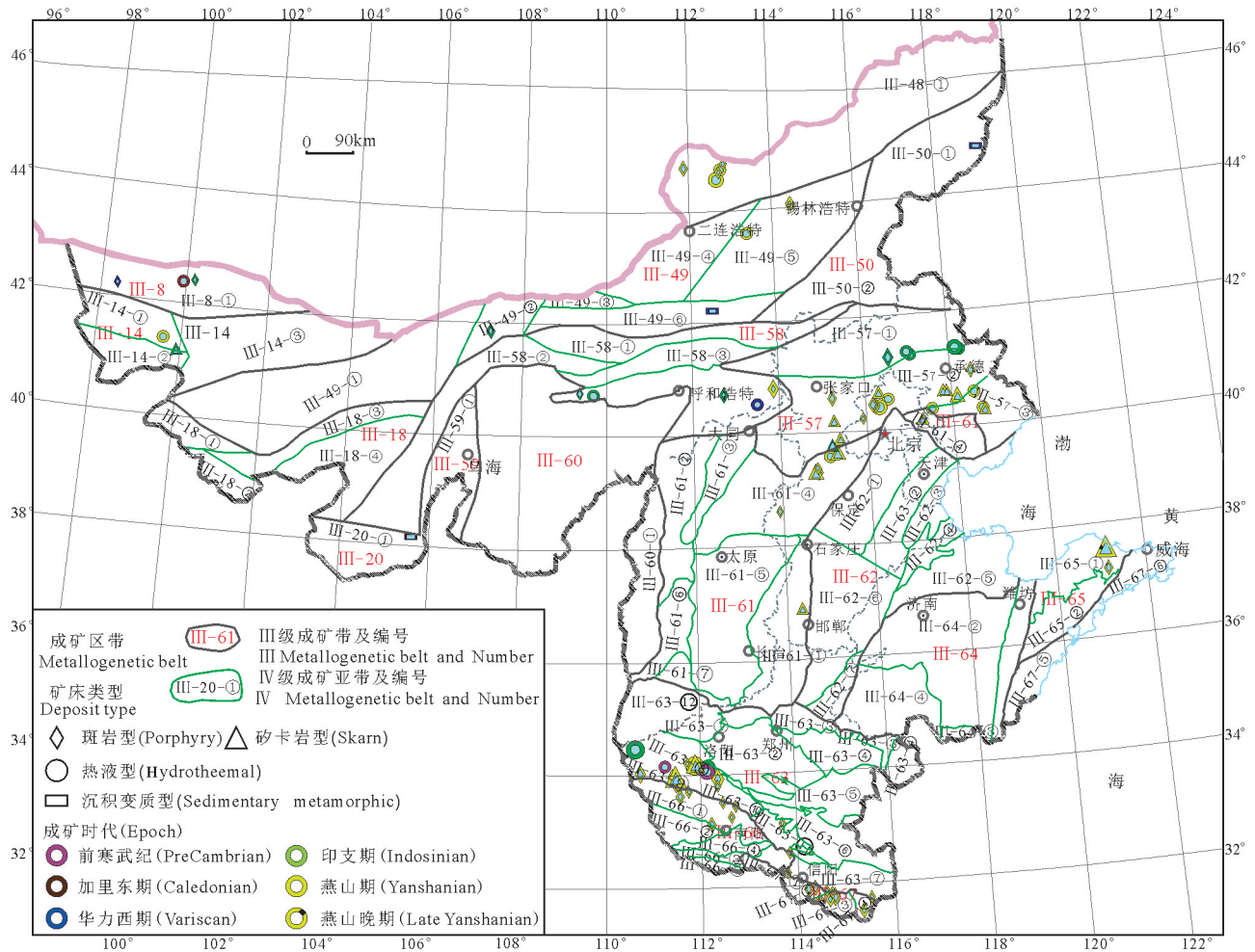


图2 华北地区钼矿成矿规律略图(据李俊建等,2013修改^①)

Fig. 2 A sketch of the metallogenic regularity of molybdenum deposits in North China (modified from Li Junjian et al., 2013^①)

还是中酸性斑岩,均为高硅、富钾、贫钠的高钾钙碱性岩,成矿专属性明显。钼矿体主要赋存于斑岩体内部,其次为内外接触带附近。对于角砾岩型钼矿,本次将它们归属于斑岩型钼矿的亚类。该类矿床矿石矿物组合较简单,多为辉钼矿和黄铁矿。斑岩型钼矿床产地虽总数不多,但易形成超大型或大型矿床,以河南、内蒙古、河北最为集中。代表性矿床有河南的南泥湖、三道庄、夜长坪钼矿等,内蒙古的曹四夭、迪彦钦阿木、查干花钼矿等,河北的大湾、撒岱沟门钼矿等。

3.1.2 接触交代型钼矿

研究区接触交代型钼矿床已探明储量仅次于斑岩型。该类型钼矿分布范围广泛,尤其在河南、山东都有超大型钼(钨)矿产出。全区接触交代型钼矿产地33处,其中大型及以上5处,中型6处,小型3处,矿

点19处。该类钼矿床通常不独立产出,岩体内部形成斑岩型矿床,外围接触带形成矽卡岩型矿床,且多与钨矿或铜矿共伴生,如河南省南泥湖—三道庄斑岩—矽卡岩型钼钨矿、夜长坪斑岩—矽卡岩型钼钨矿、山东省邢家山矽卡岩型钼(钨)矿等。

3.1.3 热液脉型

热液型钼矿一般规模较小,多为矿点、矿化点,少数为小型,全区热液型钼矿产地24处,其中大型1处,中型2处,小型7处,矿点14处。该类型钼矿在河南、内蒙古和河北三省有少量产出,研究程度相对较低,大致有3种表现形式:(1)断裂带中的石英脉型;(2)花岗斑岩脉(内)外接触;(3)石英(硅化)—钾长石(化)脉(带)型,当矿物结晶粗大时可形成伟晶岩脉型矿体。代表性矿床有河南省寨凹、纸坊和内蒙古曹家屯钼矿等。

3.1.4 沉积变质型

研究区沉积变质型钼矿仅在内蒙古阿拉善地区发现1处,成矿时代为寒武纪,为元山子小型钼镍矿。矿区地表基本被第四系覆盖,下部可见寒武纪地层,地表未见到出露。镍、钼矿体赋存于寒武系张夏组地层中,呈条带状产出,受岩相古地理及沉积环境的控制作用明显。

3.2 矿产预测类型划分

矿产预测类型是从成矿预测和矿产资源潜力评价的角度对矿产资源进行分类的一种方法,具有区域

性但也兼顾典型矿床的一般性成矿规律,其理论基础就是成矿系列理论的矿床式(王登红,2013)。依据钼矿预测类型划分原则(陈毓川,2010;叶天竺,2013;王登红,2013)以及已发现矿床成矿类型,主要预测类型有斑岩型、矽卡岩型、热液型、沉积变质型。华北地区钼矿资源丰富,产出类型多样,根据全国钼矿资源预测类型划分方案,华北地区提出钼矿预测类型主要为斑岩型、矽卡岩型、热液型和沉积变质型等(李俊建等,2013),与全国钼矿预测类型相同。主要钼矿矿产预测类型详见表1。

表1 华北地区钼矿矿产预测类型一览
Table 1 Prediction type of Mo deposit in North China

所在省份	矿床类型	矿产预测类型	典型矿床	典型矿床规模	成矿时代/Ma
内蒙古	斑岩型	小东沟式斑岩型钼矿	乌兰德勒钼矿	大型	131.3±1.6(陶继雄等,2017)
	斑岩型	乌努格吐山式斑岩型铜钼矿	乌努格吐铜钼矿	超大型	178±10(李诺等,2007)
	斑岩型	曹家屯式岩浆热液型钼矿	曹四天钼矿	超大型	143.1±2.4(Zhou et al.,2019)
	斑岩型	小东沟式斑岩型钼矿	太平沟钼矿	中型	129.4±3.9(王圣文等,2009)
	斑岩型	小东沟式斑岩型钼矿	敖仑花钼矿	大型	132±1(马星华等,2009)
	斑岩型	撒岱沟门式斑岩型钼矿	大苏计钼矿	中型	222.5±3.2(张彤等,2009)
	斑岩型	小狐狸山式斑岩型钼矿	小狐狸山钼矿	中型	213.2±4.6(张雨莲等,2012)
	斑岩型	小东沟式斑岩型钼矿	小东沟钼矿	中型	135.5±1.5(聂凤军等,2007)
	斑岩型	撒岱沟门式斑岩型钼矿	查干花钼矿	大型	242.7±3.5(蔡明海等,2011a)
	斑岩型	毕鲁干甘斑岩型钼矿	毕鲁干甘钼矿	中型	237.9±1.7(李俊建等,2016a)
	斑岩型	乌努格吐山式斑岩型铜钼矿	岔路口钼矿	超大型	148±1(刘军等,2013)
	热液型	曹家屯式岩浆热液型钼矿	泉子沟钼矿	大型	159.8±1.0(张明玉等,2018)
	沉积变质型	元山子式沉积(变质)型钼矿	元山子镍钼矿	小型	寒武纪
河北	斑岩型	撒岱沟门式斑岩型钼矿	撒岱沟门钼矿	大型	237±2(张莉莉等,2019)
	接触交代型	大湾式接触交代型钼矿	大湾钼矿	大型	144.4±7.4(黄典豪等,1996)
	热液型	唐杖子式热液型钼矿	唐杖子金钼矿	中型	170.1±1.6(李正远等,2014)
北京	斑岩型	大庄科式爆破角砾岩型钼矿	大庄科钼矿	中型	136.8±2.6(刘舒波等,2012)
	矽卡岩型	三道庄式矽卡岩型钼矿	延庆东三岔钼矿	中型	T
山东	斑岩型	尚家庄式斑岩型钼矿	尚家庄钼矿	中型	116.4±1.6(李杰等,2013)
	矽卡岩型	邢家山式矽卡岩型钼矿	邢家山钼矿	超大型	157±2(丁正江等,2012)
河南	斑岩-矽卡岩型	南泥湖式斑岩-矽卡岩型钼钨矿	夜长坪钼钨矿	大型	145.3±4.4(毛冰等,2011)
	斑岩-矽卡岩型	南泥湖式斑岩-矽卡岩型钼钨矿	南泥湖-三道庄钼钨矿	超大型	141.5±7.8(李永峰等,2004)
	斑岩型	石门沟式斑岩型钼矿	石门沟钼矿	中型	(156.1±3.4)~(228.0±4.1)(李靖辉,2014)
	热液型	大湖式热液型钼矿	大湖金钼矿	大型	(215.4±5.4)~(255.6±9.6)(李诺等,2008)
	热液型	大湖式热液型钼矿	前范岭钼矿	中型	237±1.9(高阳等,2010)
	热液脉型	寨凹式热液型钼矿	寨凹钼矿	小型	1686±67(李厚民等,2009)
	斑岩型	石门沟式斑岩型钼矿	母山钼矿	中型	142.0±1.8(杨梅珍等,2011)
	斑岩型	千鹅冲式斑岩型钼矿	千鹅冲钼矿	超大型	128.8±2.6(杨梅珍等,2010)
	斑岩型	千鹅冲式斑岩型钼矿	汤家坪钼矿	大型	113.1±7.9(杨泽强,2007)
山西	斑岩型	南泥湖式斑岩型铜钼矿	后峪铜钼矿	中型	173~225

4 钼矿成矿规律

4.1 成矿时间规律

成矿时代的厘定,是研究矿床成因、分析成矿环境、厘定成矿条件、总结成矿规律的重要手段,对矿产勘查及预测具有重要意义。华北地区钼矿分布广泛,矿床的产出受成矿背景、构造环境影响明显,根据它们在空间上的相邻特征,成矿时代的连续性,成矿地质背景、矿床特征以及矿床成因的相似性,全区可以划分为东秦岭—大别钼成矿带、华

北陆块北缘钼成矿带、黑鹰山—雅干钼成矿带和大兴安岭中南段钼成矿带。虽然各成矿带钼矿床成矿环境不同,但其成矿时代相对集中,大体可以划分为古元古代(1.88~1.75 Ga)、二叠纪—三叠纪(200~260 Ma)和侏罗纪—白垩纪(140~160 Ma)和110~130 Ma)3个成矿时期。

4.1.1 古元古代

古元古代钼成矿事件主要发生在东秦岭—大别钼成矿带,该带位于华北陆块南缘与秦岭造山带的接触部位(图3),呈NWW-SEE向展布,南北分别

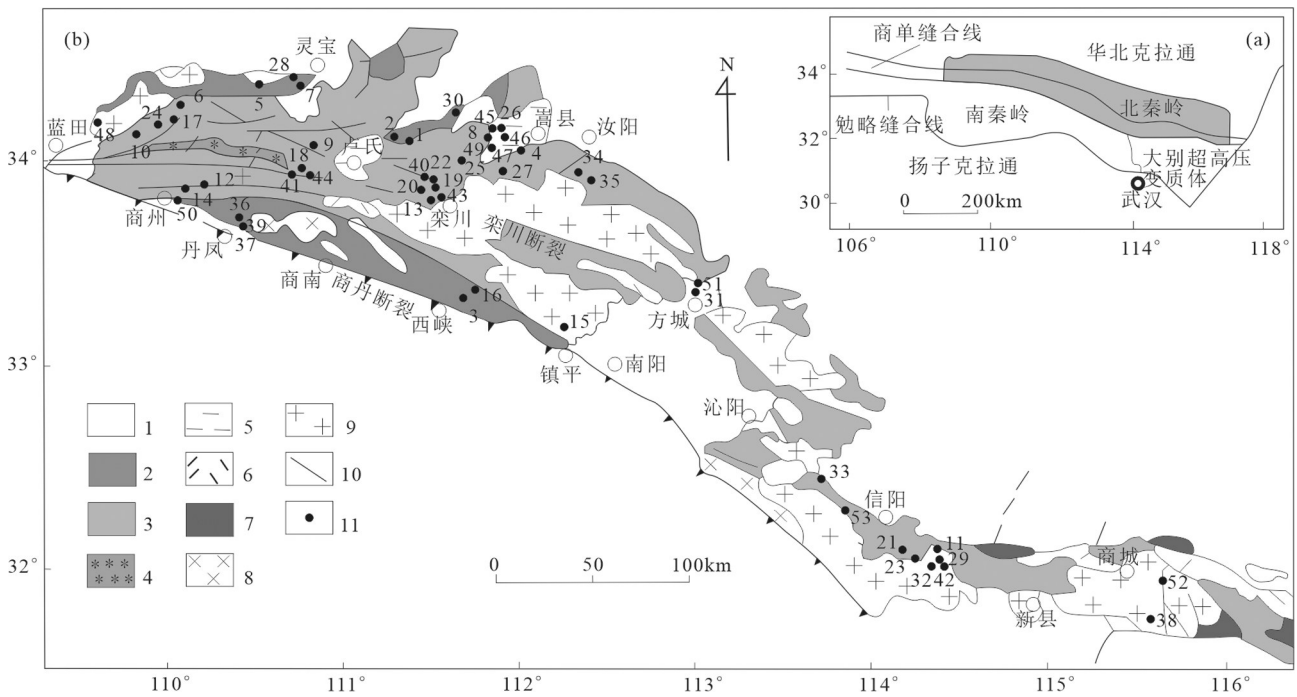


图3 东秦岭—大别钼矿带地质略图(据Mao et al., 2008, 2011a; 范羽等, 2014修改)

1—第四系;2—太古宙基底;3—元古宙火山岩碎屑岩;4—太古宙火山岩碎屑岩;5—三叠系碎屑岩;6—中生代火山岩碎屑岩;7—白垩系火山岩;8—加里东期花岗岩;9—燕山期花岗岩;10—主要断裂;11—钼矿床。
 钼矿床编号:1—龙门店;2—寨凹;3—石门;4—前范岭;5—马家洼;6—黄龙铺;7—大湖;8—东菠菜沟;9—月河坪;10—八里坡;11—晏湾;12—马河;13—孔子沟;14—南台;15—秋树湾;16—灰柴沟;17—石家湾;18—夜长坪;19—三道庄;20—上房沟;21—肖畈;22—南泥湖;23—母山;24—金堆城;25—红石窑;26—雷门沟;27—鱼池岭;28—泉家峪;29—千鹤冲;30—沙坡岭;31—莲花池;32—大银尖;33—天目沟;34—竹园沟;35—东沟;36—扫帚坡;37—东沟口;38—汤家坪;39—老界岭;40—黑家庄;41—莲花沟;42—夏洼;43—鱼库;44—潘河;45—纸房;46—大石门沟;47—张湾后;48—西沟;49—螃蟹沟;50—大石沟;51—杨家庄;52—朱斐店;53—大沙地

Fig. 3 Regional geological map of molybdenum mineralization belt in east Qinling-Dabie (modified from Mao et al., 2008, 2011a; Fan Yu et al., 2014)

1-Quaternary sediments; 2-Archean basement; 3-Proterozoic volcanic clastic rocks; 4-Archean volcanic clastic rocks; 5-Tertiary clastic rocks; 6-Mesozoic clastic rocks and volcanic rocks; 7-Cretaceous volcanic rocks; 8-Caledonian granite; 9-Yanshanian granite; 10-Main faults; 11-Molybdenum deposits. Names of molybdenum deposits: 1-Longmendian; 2.Zhaiiao; 3-Shimen; 4-Qianfanling; 5-Majiawa; 6-Huanglongpu; 7-Dahu; 8-Dongbocaigou; 9-Yueheping; 10-Balipo; 11-Yanwan; 12-Mahe; 13-Dawangou; 14-Nantai; 15-Qiushuan; 16-Huichaigou; 17-Shijiawan; 18-Yechangping; 19-Sandaozhuang; 20-Shangfanggou; 21-Xiaofan; 22-Nannihu; 23-Mushan; 24-Jinduicheng; 25-Hongshiyao; 26-Leimengou; 27-Yuchiling; 28-Quanjiayu; 29-Qianechong; 30-Shapoling; 31-Lianhuachi; 32-Dayinjian; 33-Tianmugou; 34-Zhuyuangou; 35-Donggou; 36-Saozhupo; 37-Donggoukou; 38-Tangjiaping; 39-Laojieling; 40-Heijiazhuang; 41-Lianhuagou; 42-Xiawa; 43-Yuku; 44-Panhe; 45-Zhifang; 46-Dashimengou; 47-Zhangwanhou; 48-Xigou; 49-Pangxiegou; 50-Dashigou; 51-Yangjiazhuang; 52-Zhufeidian; 53-Dashadi

以高丹、三宝断裂为界,后者通常认为是秦岭造山带的反向逆冲边界(陈衍景等,1992)。1.8~1.5 Ga,古宽坪洋壳沿栾川断裂向北俯冲到华熊地块之下,诱发的弧岩浆作用形成熊耳群一套玄武岩、玄武安山岩、安山岩、英安岩和流纹岩组合,含矿热液随岩浆上侵并富集成矿,形成中高温热液脉型钼矿床,成矿时代集中于1.88~1.75 Ga。代表性矿床——寨凹热液脉型钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄的加权平均值为(1753±26)Ma(MSWD=3.2)(邓小华等,2009);龙门店银(钼)矿中辉钼矿的 Re-Os 同位素等时线年龄为1875 Ma(赵太平,2007;魏庆国等,2009a),是中国已知成矿时代最早的钼矿床。

4.1.2 二叠纪—三叠纪

二叠纪—三叠纪是华北地区钼矿的一个重要成矿时期,在东秦岭—大别钼矿带、华北陆块北缘钼矿带、黑鹰山—雅干钼矿带和大兴安岭中南段钼矿带均发育了众多斑岩型、热液脉型、斑岩—矽卡岩型钼矿床。在这3条钼成矿带中,黑鹰山—雅干钼矿带受特殊大地构造位置影响,成矿时代较老,主要介于260~220 Ma。该成矿带位于内蒙古北山地区,大地构造位置位于古生代哈萨克斯坦板块、塔里木板块及红柳河—牛圈子—洗肠井洋盆的交接地带(徐焱等,2020)。晚志留世—早石炭世,该区两大板块及洋盆的多期次碰撞、拼贴,形成了岛弧—岩浆岩带,216~220 Ma(张雨莲等,2012)开始由碰撞后进入板内伸展环境,强烈的构造—岩浆活动带来了丰富的成矿物质,形成以流沙山钼金矿床(辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为(260±10)Ma(聂凤军等,2002))、小狐狸山钼矿床(辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为(220±2.2)Ma(彭振安等,2010))等为代表的大、中型钼矿床。

对于东秦岭—大别钼矿带而言,238~218 Ma,扬子板块、华北板块与夹于其间的秦岭造山带沿勉略和高丹2条俯冲带由南向北斜向俯冲拼贴一起,于200~220 Ma进入造山后期的拉张伸展阶段,加厚的岩石圈具重力不稳定性,发生快速转换,导致岩石圈发生拆沉减薄并伴随地壳的快速隆升,从而使软流圈地幔基性岩浆上涌和深部物质上升(李锦轶,2001)。此时期,成矿元素在流体中的浓度随压力增大而急剧增高,随流体沿通道快速上侵并在构造有利部位沉淀、富集,形成钼矿床,如嵩县前范岭

钼矿辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为(239±13)Ma(高阳等,2010)、灵宝市大湖中型钼金矿床辉钼矿 Re-Os 模式年龄为(223.0±2.8)Ma~(232.9±2.7)Ma(李厚民等,2008)、大石门沟钼矿床 Re-Os 同位素平均年龄为(203.18±4.06)Ma(李靖辉,2014)。

古生代以来,古亚洲洋向华北板块俯冲、拼贴,并于晚二叠世完成闭合(Xiao et al., 2003),在三叠纪进入造山后伸展阶段(聂凤军等,2011),于华北陆块北缘形成了大量造山后花岗岩。华北陆块北缘钼矿带(图4)主要在此时期形成,该钼矿带西起内蒙古四子王旗,东至辽宁锦州—北票一线,受NE、NNE、和近EW向构造控制明显。带内已发现钼(铜)矿床(点)近40处,矿床类型主要为矽卡岩型、斑岩型、斑岩—矽卡岩型和热液型(代军治,2008;聂凤军等,2011)。近年来,华北陆块北缘钼矿带相继发现了多处超大型及大中型钼矿床,成矿时代集中于250~220 Ma,揭开了以查干花大型斑岩型钼矿床(238.6±4.4)Ma(李光耀等,2020)、大苏计大型斑岩型钼矿床(222.5±3.2)Ma(张彤等,2009;吴昊等,2014)、撒岱沟门大型斑岩型钼矿床(237±2)Ma(张莉莉等,2019)、查干德尔斯大型斑岩型钼矿床(243±2.2)Ma(蔡明海等,2011b)、车户沟中型斑岩型钼矿床(250.2±7.2)Ma(孟树等,2013)为代表的印支期成矿的序幕。

对于大兴安岭中南段钼成矿带而言,该时期成矿活动相对较少。古生代以来,该带属于西伯利亚板块南缘,并于三叠纪由北向南逐渐增生,与其南侧的华北板块碰撞、拼贴于索伦山—林西缝合带(Xiao et al., 2003),形成早二叠世高钾钙碱性花岗岩。于三叠纪,该区进入同造山挤压收缩向造山后拉张伸展作用的转换阶段,强烈的构造—岩浆活动为成矿提供了动力学机制和运输通道,并形成以毕鲁干甘中型斑岩型钼矿(237.9±1.7Ma)(李俊建等,2016a)、宝格达乌拉大型斑岩型钼矿(240.9±2.5 Ma)(刘勇等,2012)为代表的钼矿床,成矿时代主要为250~220 Ma。

4.1.3 侏罗纪—白垩纪

侏罗纪—白垩纪为华北地区钼矿的主成矿期,成矿类型以斑岩型和接触交代型为主,与燕山期大规模岩浆侵入活动密切相关。自中侏罗世以来,古太平洋板块开始沿NWW向俯冲于欧亚板块之下,

导致中国东部构造体制发生转变,形成了广泛发育的弧后岩浆岩。在此环境下,下地壳重熔形成含钼花岗质岩浆,在构造薄弱区上侵并发生含矿热液浓集、流体不混溶等水岩相互作用,含钼热液发生迁移、富集、沉淀,并形成钼矿床。进入早白垩世,华北克拉通发生强烈克拉通破坏,岩石圈减薄、软流圈上涌事件,成矿流体再次活化、浓集、成矿,最终形成大量产出的斑岩型、矽卡岩型、斑岩-矽卡岩型钼矿床,成矿时代大体可以分为2期:140~160 Ma和110~130 Ma。东秦岭—大别钼矿带形成以南泥湖—三道庄钼钨矿辉钼矿(141.5±7.8)Ma(李永峰等,2004),夜长坪钼钨矿(145.3±4.4)Ma、(144.89±0.96)Ma(毛冰等,2011),东沟钼矿床(116.5±1.7)Ma~(115.5±1.7)Ma(叶会寿等,2006),千鹅冲钼矿(128.7±7.3)Ma(杨梅珍等,2010);胶东地区则形成以邢家山斑岩-矽卡岩型钼矿(158.7±2.06 Ma)(丁正江等,2012)、尚家庄斑岩型钼矿(116.9±0.81 Ma)(Chenget al., 2017);华北陆块北缘钼成矿带形成以大庄科爆破角砾岩型钼矿床(136.8±2.6 Ma)(刘舒波等,2012)、泉子沟斑岩型钼矿(170.8±2.0 Ma)(Zhanget al., 2020)、曹四夭斑岩型钼矿(143.1±2.4 Ma)(Zhouet al.,2019)、寿王坟矽卡岩型铜(铁、钼)矿(128±1 Ma)(董朋生等,2018);大兴安岭中南段钼成矿带形成以乌兰德勒铜钼矿辉钼矿(131.3±1.6 Ma)(陶继雄等,2017)、敖仑花铜钼矿(132±1 Ma)(马星华等,2009)、太平沟钼矿(129.4±3.9 Ma)(王圣文等,2009)为代表的一批大型、超大型钼矿床。

4.2 空间分布规律

不同的大地构造环境造就了不同时代、不同类型的钼矿床。长城纪在豫陕陆缘裂谷盆地中形成了热液脉型钼矿;新元古代至早中寒武世,在华北古陆与秦祁昆造山系过渡带的陆缘弧盆区形成沉积变质型钼镍矿床。二叠纪—三叠纪,中国东部处在古特提斯构造域向古太平洋构造域的转换时期,华北陆块北缘及其北侧基底构造活化,中酸性浅成斑岩体侵位,形成斑岩型钼矿床;在华北陆块南缘,扬子板块与华北板块拼合,在陆缘岩浆弧形成岩浆热液型钼矿,在东秦岭地区,钼矿床主要分布在商丹断裂带北部,晋豫碰撞岩浆岩带之小秦岭—伏牛山碰撞造山带内,矿床形成于活动大陆边缘构造环境中,与中生代酸性岩浆岩关系密切。在桐柏地

区,钼矿床主要分布于桐柏—大别火山岩浆岩带之信阳逆冲推覆火山岩带内(祝少辉,2015),赋矿地层为新太古界至下古生界的碎屑岩—碳酸盐岩及变质岩、火山岩。早白垩世,华北地区东部进入大规模伸展裂陷时期,在华北断陷盆地群的四周发育隆起和陆内岩浆弧,生成大量的斑岩型和接触交代型钼矿。印支期和燕山期花岗(斑)岩与斑岩型、接触交代型钼矿关系密切,岩体以高硅、过铝、富碱、高钾钙碱性系列花岗质岩石为主,“小岩体成大矿”明显,如河北撒岱沟门钼矿,含矿斑岩体以浅成—超浅成相小岩株,岩枝为主,一般以小而复杂的高侵位复式斑岩成矿最好;河南省汤家坪、千鹅冲等钼矿成矿岩体均为细粒花岗岩—花岗斑岩小岩体。

4.3 成矿物质来源

前人对研究区钼矿物质来源进行了大量研究,但壳源来源、幔源来源还是壳幔混源问题仍存在不同观点(侯增谦等,2009,2015)。晚古生代末期,古亚洲洋闭合引发的构造—岩浆事件,为研究区北部钼矿提供了丰富的物质来源和强大的动力学环境。印支期—燕山期以来,扬子板块向华北板块俯冲碰撞以及东部古太平洋板块向欧亚板块斜向俯冲,造成研究区岩石圈地幔由增厚转向拆沉减薄,软流圈上涌,并发生壳幔混熔,强烈的水—岩相互作用促使钼元素富集,并沿构造通道随岩浆上侵,在有利地段沉积成矿。已有资料表明,河南省南泥湖斑岩型钼矿床斑岩体 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值为0.7034~0.7080, $\delta^{34}\text{S}$ 为0.37‰~5.44‰(罗铭玖等,1991),石英、方解石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为8.9‰~12.5‰(秦臻等,2012;向君峰等,2012);秋树湾钼矿床斑岩体 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值为0.70495, $\delta^{34}\text{S}$ 为-0.1‰~2.7‰(秦臻,等2012),石英、方解石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为9.2‰~10.59‰(向君峰等,2012);安妥岭钼矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 为0.7‰~2.8‰(者萌等,2014),辉钼矿 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值范围分别为17.426~17.822、15.396~15.495和37.409~37.239;黄铁矿的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值范围分别为16.366~16.519、15.229~15.251和36.410~36.571(卢仁等,2013);山东省邢家山钼矿床辉钼矿Re含量为 $(2.4571\pm 0.0084)\times 10^{-6}\sim(7.2463\pm 0.0251)\times 10^{-6}$;内蒙古敖仑花斑岩型钼铜矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于-1.2~3.5(邹滔等,2011),辉钼矿Re含量主要在 $12.9\times 10^{-6}\sim$

38.9×10^{-6} , 平均为 24.5×10^{-6} (马星华等, 2009; 舒启海等, 2009); 小东沟斑岩型钼矿床黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $3.2\text{‰} \sim 4.8\text{‰}$, 辉钼矿 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $4.2\text{‰} \sim 5.4\text{‰}$, 石英 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $4.6\text{‰} \sim 13.4\text{‰}$ (聂凤军等, 2007); 车户沟斑岩型钼矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $-0.608\text{‰} \sim 0.861\text{‰}$ (翁海蛟等, 2014), $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 $-5.1\text{‰} \sim 4.2\text{‰}$, $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 $-91\text{‰} \sim -88\text{‰}$ (孟树等, 2013)。从以上数据可以看出, 钼矿床成矿流体以岩浆水为主, 主要来源于壳源或壳幔混源, 并有后期天水混入, 成矿物质主要来源于壳幔混源, 少量来源于壳源 (张遵忠等, 2009; 丁正江等, 2012; 刘舒波等, 2012; 者萌等, 2014; 李俊建等, 2016b)。

4.4 控矿因素

华北地区钼矿床成因类型以斑岩型、矽卡岩型为主, 另两种类型——热液脉型及沉积变质型钼矿床规模小, 资源量有限。

4.4.1 斑岩型钼矿床控矿因素

斑岩型矿床是指与浅成—超浅成英质斑岩侵入岩有关的浸染状、细脉浸染状为主的矿床, 以品位低、矿量大著称, 它是全球铜和钼最主要的来源。该类型矿床主要产于活动大陆边缘、岛弧等构造环境, 矿化与岩浆晚期高钾钙碱性系列中酸性小岩体关系密切, 以细脉状、网脉状、浸染状为主, 矿体多产于岩体中或其附近; 围岩蚀变普遍发育且分带明显, 从岩体中心向外依次为钾化带、硅化带、青磐岩化带、绢英岩化带和泥化带, 矿体多产于钾化带、硅化带、绢英岩化带中。矿石类型由岩体向外依次为: 无矿带→辉钼矿+黄铜矿+斑铜矿→黄铁矿±黄铜矿→黄铁矿→方铅矿+闪锌矿。

斑岩型是华北地区钼矿床主要的成矿类型, 在研究区广泛产出, 成矿时代主要为晚古生代和中生代。晚古生代斑岩型钼矿床主要分布在东秦岭—大别钼成矿带、大兴安岭中南段钼成矿带和华北陆块北缘钼成矿带西段, 成矿时代集中于 220~200

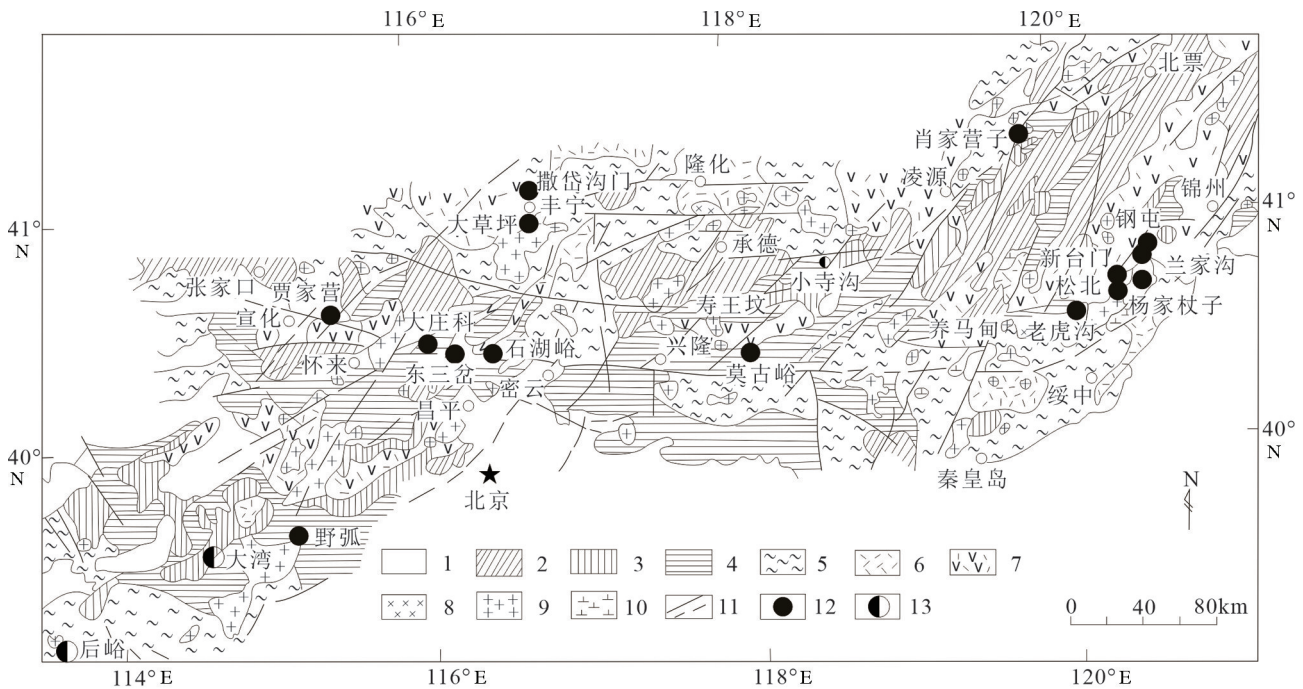


图4 燕辽钼(铜)成矿带地质略图(据黄典豪等, 1996修改; 代军治等, 2008)

- 1—新生界; 2—中生届; 3—古生界; 4—新元古界; 5—太古代变质岩; 6—中生代酸性火山岩; 7—中生代基性—中性火山岩; 8—基性侵入岩;
- 9—中生代花岗岩类; 10—中生代中性侵入岩; 11—断裂; 12—钼矿床; 13—铜(钼)多金属矿床

Fig. 4 Schematic geological map of the Yanshan-Liaoning molybdenum belt (modified from Huang Dianhao et al., 1996; Dai Junzhi et al., 2008)

- 1—Cenozoic; 2—Mesozoic; 3—Paleozoic; 4—Neoproterozoic; 5—Archean metamorphic rocks; 6—Mesozoic acid volcanic rocks; 7—Mesozoic basic-medium volcanic rocks; 8—Basic intrusive rock; 9—Mesozoic Granitoids; 10—Mesozoic medium intrusive rocks; 11—Faults; 12—Molybdenum deposits; 13—Copper (Molybdenum) polymetallic deposit

Ma。前已述及,受扬子板块向华北板块碰撞和古亚洲洋俯冲、拼贴于华北板块之上的影响,在华北板块南、北缘形成巨大的印支期花岗岩带,成矿母岩沿NE或近NW向主断裂产出,以高钾钙碱性为主,控矿构造与区域大地构造格局一致,次级断裂常见有后期脉岩填充。矿化蚀变可分为绢英岩化、硅化、钾化、青磐岩化,其中钼矿主要形成于绢英岩化、硅化阶段。矿石矿物主要为辉钼矿,并有少量的黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、白钨矿等,呈细脉浸染状、网脉状和细脉状产出。

晚侏罗世—早白垩世是华北地区斑岩型钼矿床成矿的爆发期,受古太平洋板块向欧亚板块俯冲影响,在中国东部地区形成一套壳幔混熔的高钾钙碱性花岗岩系列,并在东秦岭—大别山钼成矿带、华北陆块北缘钼矿带、大兴安岭中南段钼矿带均形成了一系列与之相关的大型、超大型钼矿床,成矿时代集中于160~140 Ma和130~110 Ma。钼矿形成于小斑岩体结晶分异后期的流体分异,而小斑岩体来源于花岗质岩浆斜长石结晶分异后的岩浆残余。矿石矿物成分简单,主要为辉钼矿、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿和闪锌矿,在岩体内外接触带呈(细脉)浸染状、斑杂状分布。围岩蚀变一般从内向外是钾长石化、硅化、黑云母化、绢云母化、绿泥石化蚀变。

4.4.2 接触交代型钼矿床控矿因素

接触交代型也是华北地区钼矿床主要的成矿类型,该类型与碳酸盐岩地层关系密切。当花岗岩体与大理岩—含钙质的碎屑岩接触时,在岩体外接触带形成矽卡岩化带和相应的接触交代型钼钨(白钨矿)矿,较大岩体外侧的接触交代型钼钨矿体厚度可达100 m以上。有关接触交代型铜钼矿床,钼矿体通常在斑岩体中富集,铜矿体则更易富集在矽卡岩带中。研究区内与矽卡岩型钼矿床关系密切的碳酸盐地层主要有古元古界荆山群,中元古界官道口群、新元古界栾川群、蓟县系雾迷山组以及泥盆系—石炭系一套碎屑—碳酸盐岩组合。钼矿体形态较为简单,一般呈层状、似层状、透镜状分布于碳酸盐岩地层内,矿体内一般还伴生铜、钨等,局部可形成单独的铜、钨矿体。矿石中金属矿物主要有辉钼矿、白钨矿、黄铜矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、磁黄铁矿等,呈不等粒状、胶状结构,浸染状、块状、细

脉状构造。

4.4.3 热液型钼矿床控矿因素

热液型钼矿床在华北地区出露相对较少,主要分布在华北陆块北缘钼矿带和东秦岭—大别钼矿带,成矿时代主要集中于侏罗纪—白垩纪,如河北省安妥岭钼矿床、四拨子—六拨子铜多金属矿床、茅山花市钼矿床、磴上钼矿床;内蒙古达拉敖包钼矿床、七一山钼矿床等。从已有资料可以看出,热液型钼矿床主要分布于斑岩型矿床外围,其硫化物中硫同位素组成与斑岩型钼矿相似,是与斑岩同一构造—岩浆—成矿事件的产物(段士刚等,2010)。矿体主要呈似层状、脉状、透镜状产出,钼矿体主要呈细脉状、网脉状、浸染状等产出。此外,华北东、西部陆块在约1850 Ma沿中部造山带完成拼合(Wang et al.,2016),随后在约1831 Ma形成了熊耳裂谷(赵太平等,2007),强烈的构造—岩浆活动,为该区含矿热液的运移、富集提供了良好的动力学和热力学条件,形成了一些热液型钼矿床,如河南寨凹钼矿(李厚民等,2009)、龙门店钼矿(魏庆国等,2009a)等。

4.4.4 沉积变质型钼矿床控矿因素

沉积变质型钼矿在南方寒武系黑色岩系中相对常见,该类矿床产出少,规模小,开发难度大。在北方仅在内蒙阿拉善地区发育一处一元山子镍钼矿。该矿床矿体赋存于寒武系张夏组含炭(夹石英)绢云母千枚岩、黑色(含镍、钼等元素)含炭石英绢云母千枚岩之中,矿体呈条带状产出,与围岩无明显界线。矿石以粒状结构为主,同时具交代结构、变质生长结构、胶状结构,细脉浸染状、浸染状、条带状、碎屑状构造,主要矿石矿物有黄铜矿、辉砷镍矿、针镍矿、硫砷镍矿。

5 钼矿找矿方向及资源潜力分析

华北地区钼矿资源丰富,找矿潜力巨大,近年在东秦岭—大别、华北陆块北缘西段、黑鹰山—亚干印支期、燕山期斑岩型、热液脉型钼矿床的发现,为该区钼矿勘查指明了新的方向,同时也说明成矿带内仍存在巨大的找矿空间。

(1)东秦岭—大别钼矿预测区:该区是中国最重要的钼多金属成矿区,钼矿床多呈NWW向产出,从南到北具有斑岩型Cu—Mo矿、斑岩型Mo矿和斑岩型Au—Mo矿的分带现象,与从俯冲带到克拉通

边缘斑岩Cu矿、斑岩Cu-Mo矿、斑岩Mo矿依次发育的分带现象(Cooke et al., 2005)相似,表明钼矿的形成与扬子板块向华北板块俯冲的构造背景关系密切(魏庆国等,2009b)。该区成矿条件十分优越,是获得钼矿找矿突破的重要地区。近年来在该成矿带先后发现了嵩县雷门沟超大型钼矿床、栾川县冷水—赤土店超大型钼钨矿床、嵩县前范岭大型钼矿床、汝阳县竹园沟中型钼矿床,显示了巨大的找矿潜力,而汝阳—嵩县—栾川一带印支期、燕山期高钾钙碱性花岗岩类及其与之相关的斑岩型、热液脉型钼矿仍为重点找矿方向。

(2)华北陆块北缘西段钼矿预测区:该区地处华北板块、西伯利亚板块和太平洋板块的结合部位,是中国重要的钼金属成矿区,印支期—燕山期该区经历了多期次构造—岩浆活动,地壳强烈的挤压向伸展作用的转变,造成了大量花岗岩类的发育和斑岩、矽卡岩型钼矿床的形成,是河北、内蒙中东部钼矿勘查的有利地段。该带西段成矿地质条件良好,工作程度较低,近年来,在河北平泉—内蒙赤峰—凉城一带先后发现了柴家沟、车户沟、曹四天、查干花、鸡冠山等一系列大型、超大型斑岩型钼矿床,为该带钼矿床的勘查注入了新的活力,是钼矿勘查的重点地区。

(3)黑鹰山—亚干钼矿预测区:该区地处华北陆块北缘西段、塔里木板块、哈萨克斯坦板块交接地带。古生代以来,多期次的构造—岩浆活动使该区普遍发育岛弧岩浆岩,高钾钙碱性中酸性、酸性岩浆岩分布广泛,钼、铜、铅、锌、金等元素异常突出,为该区成矿提供了良好的动力学环境和物质基础,形成了以西沙德盖、小狐狸山、流沙山等一系列大、中型斑岩型钼矿床,成为钼矿勘查的重点地区,而斑岩型钼矿成为主要找矿方向。

6 结 论

(1)通过对华北地区98处钼矿床资料系统分析,总结了钼矿成矿区带特征,梳理了不同类型矿床成矿特征及控矿因素,提出斑岩型、矽卡岩型、热液型和沉积变质型等4种矿产预测类型。

(2)对华北地区4条钼成矿带成矿时间规律进行了总结,成矿时代主要集中于古元古代、二叠纪—三叠纪和侏罗纪—白垩纪,以斑岩型、矽卡岩型

为主。其中,东秦岭—大别钼成矿带成矿时代集中于1.88~1.75 Ga、220~200 Ma、160~140 Ma和130~110 Ma;黑鹰山—雅干钼成矿带成矿时代主要为260~220 Ma;华北陆块北缘钼成矿带成矿时代为250~220 Ma、140~160 Ma和110~130 Ma;大兴安岭中南段钼成矿带成矿时代主要为250~220 Ma和110~130 Ma。

(3)对华北地区钼矿床成矿空间规律进行了总结,认为古元古代豫陕陆缘裂谷带,晚古生代—中生代华北陆块南、北缘陆缘活动带和哈萨克斯坦板块东南部的陆缘增生带是钼矿床主要产出部位,高钾钙碱性系列花岗质岩石与成矿关系密切。

(4)华北地区钼矿床成矿物质主要来源于壳源或壳幔混源,成矿流体以壳源或壳幔混源岩浆水为主,并有后期天水混入。

(5)开展了华北地区钼矿找矿方向及资源潜力分析,认为华北陆块北缘西段河北平泉—内蒙赤峰—凉城一带、东秦岭—大别汝阳—嵩县—栾川一带和黑鹰山—亚干地区成矿条件良好,找矿前景优越,是获得钼矿找矿突破的有利地区。

注释

①李俊建主编. 2013. 华北地区重要矿种区域成矿规律研究成果报告[R]. 天津地质调查中心,1-742.

②许立权,张彤,张明. 2013. 内蒙古自治区重要矿产区域成矿规律研究报告[R]. 内蒙古自治区地质调查院,1-654.

③周继华,赵增杰,李亮玉,侯占国,陈志方,赵祯祥. 2013. 山西省重要矿种区域成矿规律、矿产预测成果报告[R]. 太原:山西省地质调查院,1-489.

References

- Cai Minghai, Zhang Zhigang, Qu Wenjun, Peng Zhen'an, Zhang Shiqi, Xu Ming, Chen Yan, Wang Xianbin. 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):64-38(in Chinese with English abstract)
- Cai Minghai, Peng Zhen'an, Qu Wenjun, He Zhongyin, Feng Gang, Zhang Shiqi, Xu Ming, Chen Yan. 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).
- Chen Xiaodan, Ye Huishou, Wang Huan. 2014. Genesis and evolution of the Leimengou porphyry Mo deposit in West Henan Province, East Qinling-Dabie belt, China: Constraints from hydrothermal

- alteration, fluid inclusions and stable isotope data[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 710–722.
- Chen Yanjing, Fu Shigu. 1992. The tectonic environment for the formation of the Xionger Group and the Xiyanghe Group[J]. *Geological Review*, 38(4): 325–333(in Chinese with English abstract).
- Chen Yuchuan, Wang Denghong, Chen Zhenghui. 2010. Technique Requests on the Study of Major Mineral Resources and Regional Metallogeny around China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–183(in Chinese).
- Cheng Shaobo, Liu Zhenjiang, Wang Qingfeng, Wang Fujiang, Xue Yushan, Xu Lei, Wang Jianping, Zhu Baolin. 2017. Mineralization age and geodynamic background for the Shangjiazhuang Mo deposit in the Jiaodong gold province, China[J]. *Ore Geol. Rev.* 80, 876–890.
- Cooke D R, Peter Hollings, Walshe J L. 2005. Giant porphyry deposits: Characteristics, distribution, and tectonic controls[J]. *Economic Geology*, 100: 801–818.
- Dai Junzhi. 2008. The Metallogenesis and Geodynamic Settings of Molybdenum (copper) Deposits in Yan–Liao Metallogenic Belt. Ph. D. Dissertation[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English summary).
- Deng Xiaohua, Yao Junming, Li Jing, Sun Yali. 2009. Molybdenite Re–Os isotope age of the Zhaiwa Mo deposit and implications for Xiongerian mineralization in eastern Qinling Orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11):2739–2746(in Chinese with English abstract).
- Ding Zhengjiang, Sun Fengyue, Liu Jianhui, Liu Dianhao, Li Bile, Zhang Pijian, Qian Ye, Li Jie. 2012. Re–Os dating of molybdenites from the Xingjiashan molybdenum tungsten deposit in Jiaodong Peninsular and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9):2721–2732(in Chinese with English abstract).
- Dong Pengsheng, Dong Guochen, Sun Zhuanrong, Li Huawei, Wang Shushu, Wang Weiqing, Geng Jianzhen. 2018. Zircon U–Pb chronology, Hf isotopic compositions, geochemistry characteristics and geological significance of Shouwangfen complex in Yanshan region[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(6):264–276(in Chinese with English abstract).
- Duan Shigang, Xue Chunji, Liu Guoyin, Yan Changhai, Feng Qiwei, Song Yaowu, Tu Qijun, Gao Yongbao, Gao Bingyu. 2010. Geology and sulfur isotope geochemistry of lead–zinc deposits in Luanchuan district, Henan Province, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(2):375–384(in Chinese with English abstract).
- Fan Yu, Zhou Taofa, Zhang Dayu, Yuan Feng, Fan Yu, Ren Zhi, Neol White. 2014. Spatial and Temporal Distribution and Metallogical Background of the Chinese Molybdenum Deposits[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(4):784–804(in Chinese with English abstract).
- Gao Yang, Ye Huishou, Mao Jingwen. 2013. Geology, geochemistry and genesis of the Qianfanling quartz–vein Mo deposit in Songxian County, Western Henan Province, China[J]. *Ore Geol. Rev.* 55, 13–28.
- Hou Zengqian, Yang Zhiming. 2009. Porphyry deposits in continental settings of China: Geological characteristics, magmatic–hydrothermal system, and metallogenic model[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(12):1779–1817(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Zheng Yuanchuan, Geng Yuansheng. 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).
- Huang Dianhao, Du Andao, Wu Chengyu, Liu Lansheng, Sun Yali, Zou Xiaoqi. 1996. Metallochronology 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).
- Li Guangyao, Li Zhidan, Wang Jiaying, Li Xiaoguang, Li Chao, Tu Jiarun, Xie Yu, Ding Ning. 2020. Zircon U–Pb and molybdenite Re–Os Ages and geological significance of the Chaganhua molybdenum deposit, Urad Rear Banner, Inner Mongolia[J]. *Geoscience*, 34(3):494–503(in Chinese with English abstract).
- Li Houmin, Chen Yuchuan, Ye Huishou, Wang Denghong, Guo Baojian, Li Yongfeng. 2008. Mo, (W), Au, Ag, Pb, Zn mineralogical series related to Mesozoic magmatic activities in the East Qinling–Dabie Mountains[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(11): 1468–1477(in Chinese with English abstract).
- Li Houmin, Ye Huishou, Wang Denghong, Chen Yuchuan, Qu Wenjun, Du Andao. 2009. Re–Os dating of molybdenites from Zhaiwa Mo deposit in Xionger Mountain, western Henan Province, and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 28(2): 133–142(in Chinese with English abstract).
- Li Huaikun, Zhang Jian, Tian Hui, Zhou Hongying, Xiang Zhenqun, Liu Huan. 2020. Recent advances in the study of the Meso–to Neoproterozoic chronostratigraphy of the Yanliao Aulacogen on the northern margin of the North China Craton[J]. *Geological Survey and Research*, 43(2):114–126.
- Li Jie, Song Mingchun, Wang Meiyun, Li Shiyong, Zhou Mingling, Ni Shijun, Zhang Chengjiang, Ding Zhengjiang, Yue Yuepo. 2013. The molybdenite Re–Os age and genetic analysis of the Shangjiazhuang Mo deposit in Jiaodong area[J]. *Chinese Geology*, 40(5):1612–1621(in Chinese with English abstract).
- Li Jinghui. 2014. Re–Os isotopic dating of molybdenites from the Dashimengou molybdenum deposit in Songxian County, Henan Province, and its geological significance[J]. *Geology in China*, 41 (4):1364–1374(in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi. 2001. Pattern and time of the collision between the Sino–Korean and Yangtze Blocks: Evolution of the Sinian–Jurassic sedimentary settings in the Middle–Lower Reaches of the Yangtze River[J]. *Acta Geologica Sinica*, 75(1):25–34(in Chinese with English abstract).

- Li Junjian, Tang Wenlong, Fu Chao, Li Chao, Qu Wenjun, Zhang Tong, Wang Shouguang, Dang Zhicai, Zhou Yong, Zhao Lijun. 2016a. 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 Junjian, Zhou Yong, Dang Zhicai, Zhao Zelin, LiChao, Qu Wenjun, Cao Zicun, Yang Guojian, Fu Chao, Tang Wenlong. 2016b. Re-Os isotopic dating of molybdenites from the Sansheng W-Mo deposit in Huade County, Inner Mongolia, and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 35(4): 531-536(in Chinese with English abstract).
- Li Nuo, Sun Yali, Li Jin, Li Wenho. 2007. Molybdenite Re/Os isochronage of the Wunugetu Shan porphyry Cu/Mo deposit, Inner Mongolia and its implication for metallogenic geodynamnics[J]. Acta Petrologica Sinica, 23 (11): 2881-2888 (in Chinese with English abstract).
- Li Nuo, Sun Yali, Li Jing, Xue Liangwei, Li Wenbo. 2008. Molybdenite Re- Os isotope age of the Dahu Au- Mo deposit, Xiaoqinling and the Indosinian mineralization[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(4):810-816(in Chinese with English abstract).
- Li Yongfeng, Wang Chunqiu, Bai Fengjun, Song Yanling. 2014. Re-Os isotopic ages of Mo deposits in east Qinling and their geodynamic settings[J]. Mineral Resources and Geology, 18(6): 571-578(in Chinese with English abstract).
- Li Zhengyuan, Ye Huishou, He Wen, Cao Jing, Zhang Xingkang, Wang Sai, Lu Dongyu, Li Chao. 2014. Geological characteristics and molybdenite Re- Os isotopic dating of Tangzhangzi gold (molybdenum) deposit in eastern Hebei Province[J]. Mineral Deposits, 33(6):1366-1378(in Chinese with English abstract).
- Liu Jun, Wu Guang, Wang Feng, Luo Dafeng, Hu Yanqing. 2013. Geochronology and petrogeochemistry of Chalukou porphyry Mo deposit in northern Da Hinggan Mountains[J]. Mineral Deposits, 32(6):1093-1116(in Chinese with English abstract).
- Liu Qingquan, Shao Yongjun, Li Yongfei, Luo Zhengzhuan. 2017. Processes and ore genesis at the Yaochong Mo deposit, Henan Province, China[J]. Ore Geol. Rev. 86:692-706.
- Liu Shubo, Li Chao, Cen Kuang, Qu Wenjun. 2012. Re-Os dating for Molybdenite-bearing rock samples: Application in Dazhuangke molybdenum deposit in Beijing[J]. Geoscience, 26(2): 254-260(in Chinese with English abstract).
- Liu Yong, Nie Fengjun, Liu Yifei, Hou Wanrong. 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).
- Lu Ren, Liang Tao, Luo Zhaohua, Fan Binghong. 2013. Pb isotope composition and its geological significance of Antuoling porphyry molybdenum deposit in north Taihang mountain[J]. Mineral Resources and Geology, 27(1):83-88(in Chinese with English abstract).
- Luo Mingjiu, Zhang Fumin, Dong Qunying, Xu Yongren, Li Shimei, Li Kunhua. 1991. China Molybdenium Deposit[M]. Zhengzhou: Henan Sci. & Techn. Press, 1-425 (in Chinese).
- Ma Xinghua, Chen Bin, Lai Yong, Lu Yinghuai. 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).
- Mao Bing, Ye Huishou, Li Chao, Xiao Zhongjun, Yang Guoqiang. 2011. Molybdenite Re- Os isochron age of Yechangping Mo deposit in western Henan Province and its geological implications[J]. Mineral Deposits, 30(6): 1069-1074(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Pirajno F, Ye Huishou. 2011a. Mesozoic molybdenum deposits in the east Qinling-Dabie orogenic belt: Characteristics and tectonic settings[J]. Ore Geol. Rev., 43:264-293.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Bierlein F, Qü Wenjun, Du Andao, Ye Huishou, Pirajno F. 2008. Tectonic implications from Re- Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 72:4607-4626.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Duan Chao, Pirajno F, Ishiyama D, Chen Yuchuan. 2011b. A tectono-genetic model for porphyry-skarn-stratabound Cu-Au-Mo-Fe and magnetite-apatite deposits along the Middle-Lower Yangtze River Valley, Eastern China[J]. Ore Geol. Rev., 43: 294-314.
- Meng Shu, Yan Cong, Lai Yong, Shu Qihai, Sun Yi. 2013. Study on the mineralization chronology and characteristics of mineralization fluid from the Chehugou porphyry Mo- Cu deposit, Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(1): 255-269(in Chinese with English abstract).
- Nie Fengjun, Jiang Sihong, Zhao Xingmin, Bai Daming, Liu Yan, Zhao Yueming, Wang Xinling, Su Xinxu. 2002. Geological features and metallogenic type of the Liushashan gold (molybdenum) deposit in Ejin Qi (Prefecture), western Inner Mongolia[J]. Geology-Geochemistry, 1:1-7(in Chinese with English abstract).
- Nie Fengjun, Zhang Ke, Liu Yifei, Jiang Sihong, Liu Yong. 2011. Indosinian magmatic activity and molybdenum, gold mineralization along the northern margin of North China craton and adjacent area[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 41(6): 1651-1666(in Chinese with English abstract).
- Nie Fengjun, Zhang Wanyi, Du Andao, Jiang Sihong, Liu Yan. 2007. Re- Os isotopic dating on molybdenite separates from the Xiaodonggou porphyry Mo deposit, Hexigten Qi, Inner Mongolia[J]. Acta Geologica Sinica, 81(7): 36-43(in Chinese with English abstract).
- Peng Zhenan, Li Honghong, Qu Wenjun, Zhang Shiqi, Ding Haijun,

- Chen Xiaori, Zhang Bi, Zhang Yongzhen, Xu Ming, Cai Minghai. 2010. Molybdenite Re–Os age of Xiaohulishan molybdenum deposit in Beishan area, Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 29(3): 510–516(in Chinese with English abstract).
- Qin Zhen, Dai Xueling, Deng Xiangwei. 2012. Fluid inclusions and stable isotopes of Qiushuwan copper–molybdenum deposit in East Qinling orogenic belt and their geological implications[J]. *Mineral Deposits*, 31(2): 323–336(in Chinese with English abstract).
- Shu Qihai, Jiang Lin, Lai Yong, Lu Yinghui. 2009. Geochronology and fluid inclusion study of the Aoiunhua porphyry Cu–Mo deposit in Arhorqin Area, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2601–2614(in Chinese with English abstract).
- Shu Qihai, Lai Yong, Wang Chao, Xu Jiajia, Sun Yi. 2014. Geochronology, geochemistry and Sr–Nd–Hf isotopes of the Haisugou porphyry Mo deposit, northeast China, and their geological significance[J]. *J. Asian Earth Sci.*, 79:777–791.
- Tao Jixiong, Wang Tao, Chen Zhenghui, Tang Wei, Wang Renfei. 2017. SHRIMP zircon U–Pb age of the fine–grained monzonitic granite in the Wulandele molybdenum–copper polymetallic ore deposit of Inner Mongolia and its significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 36(9): 1525–1530(in Chinese with English abstract).
- Wang Changming, Lu Yongjun, He Xinyu, Mak Jessell. 2016. The Paleoproterozoic diorite dykes in the southern margin of the North China Craton: insight into rift–related magmatism[J]. *Precambrian Research*, 277:26–46.
- Wang Denghong, Chen Yuchuan, Xu Zhigang, Sheng Jifu, Zhu Mingyu, Liu Xifang, Zhang Changqing, Wang Chenghui, Wang Yonglei. 2013. Prediction type of mineral resources and its application in the assessment work of mineral resources potential[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 43(4):1092–1099(in Chinese with English abstract).
- Wang Shengwen, Wang Jianguo, Zhang Da, Qi Xiaojun, Wu Ganguo, Zhao Pizhong, Yang Zongfeng and Liu Yanbing. 2009. Geochronological study on Taipingsgou molybdenum deposit in Da Hinggan Mountain[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2913–2923 (in Chinese with English abstract)
- Wang Zhi, Wang Huichu, Shi Jianrong, Chang Qingsong, Zhang Jiahui, Ren Yunwei, Xiang Zhenqun. 2020. Tectonic setting and geological significance of Xuwujia metagabbro in Jining area, Inner Mongolia[J]. *Geological Survey and Research*, 43(2): 97–113.
- Wei Qingguo, Yuan Zhenlei, Yao Junming, Chen Wei, Qiao Bo, Zhao Taiping. 2009b. Characteristics of Mo deposits in the Eastern Qinling and comparison with those in Climax–Henderson[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(2): 259–269(in Chinese with English abstract).
- Wei Qingguo, Yao Junming, Zhao Taiping, Sun Yali, Li Jing, Yuan Zhenlei, Qiao Bo. 2009. Discovery of a ~1.9 Ga Mo deposit in the eastern Qinling orogen: Molybdenite Re–Os ages of the Longmudian Mo deposit in Henan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11):2747–2751(in Chinese with English abstract).
- Weng Haijiao, Wei Longming. 2014. The characteristic and genesis of porphyry copper molybdenum deposit from Chehugou, Inner Mongolia[J]. *Western Resources*, 126–129(in Chinese with English abstract).
- Wu Hao, Wu Guang, Tao Hong, Wang Guorui, Li Tiegang, Chen Junqi, Yang Ningning. 2014. Molybdenite Re–Os dating and fluid inclusion study of Dasuji porphyry molybdenum deposit in Zhuozi County, central Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 33(6):1251–1267(in Chinese with English abstract).
- Xiang Junfeng, Pei Rongfu, Ye Huishou, Wang Chunyi, Tian Zhiheng. 2012. Source and evolution of the ore–forming fluid in the Nannihu–Sandaozhuang Mo (W) deposit: Constraints from C–H–O stable isotope data[J]. *Geology in China*, 39(6): 1778–1789(in Chinese with English abstract).
- Xiang Zhenqun, Lu Songnian, Li Huaikun, Tian Hui, Liu Huan, Zhuang Kuo. 2020. Mesoproterozoic magmatic events in the North China Craton[J]. *Geological Survey and Research*, 43(2): 137–152.
- Xiao Wenjiao, Windley B F, Hao Jie, Zhai Mingguo. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt[J]. *Tectonics*, 22(6): 1960.
- Xu Yan, Zhang Shihong. 2020. The position of Tarim Craton in Rodinia: Advances and problems[J]. *Geological Survey and Research*, 43(2): 169–176.
- Yang Meizhen, Zeng Jiannian, Qin Yongjun, Li Faling, Wan Shouquan. 2010. LA–ICP–MS zircon U–Pb and molybdenite Re–Os dating for Qian'echong porphyry–type Mo deposit in Northern Dabie, China, and its geological significance[J]. *Geological Science and Technology Information*, 29(5):35–45(in Chinese with English abstract).
- Yang Meizhen, Zeng JianNian, Ren Aiqun, Lu Jianpei, Pan Sidong. 2011. Characteristics of Mo mineralization and zircon LA–ICP–MS U–Pb geochronology of Mushan Mo deposit from Luoshan County, Henan Province[J]. *Mineral Deposits*, 30(3):435–447(in Chinese with English abstract).
- Yang Yongfei, Li Nuo, Chen Yanjing. 2012a. Fluid inclusion study of the Nannihu giant porphyry Mo–W deposit, Henan Province, China: Implications for the nature of porphyry ore–fluid systems formed in a continental collision setting[J]. *Ore Geol. Rev.*, 46:83–94.
- Yang Zeqiang. 2007. Re–Os isotopic ages of Tangjiaping molybdenum deposit in Shangcheng County, Henan and their geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 3: 289–295(in Chinese with English abstract).
- Ye Huishou, Mao Jingwen, Li Yongfeng, Guo Baojian, Zhang Changqing, Liu Jun, Yan Quanren, Liu Guoyin. 2006. SHRIMP

- Zircon U–Pb and molybdenite Re–Os dating for the superlarge Donggou porphyry Mo deposit in East Qinling, China, and its geological implication[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(7): 1078–1088 (in Chinese with English abstract).
- Ye Tianzhu. 2013. Theoretical framework of methodology of deposit modeling and integrated geological information for mineral resource potential assessment[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43(4): 1053–1072 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Degao, Liu Jiajun, Wang Jianping. 2014. 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.
- Zhang Fangfang, Wang Yinhong, Liu Jiajun, Wang Jichun. 2018a. Ore genesis and hydrothermal evolution of the Wulandele Mo deposit, Inner Mongolia, Northeast China: Evidence from geology, fluid inclusions and H–O–S–Pb isotopes[J]. *Ore Geol. Rev.*, 93: 181–199.
- Zhang Jiahui, Wang Huichu, Guo Jinghui, Tian Hui, Ren Yunwei, Chang Qingsong, Shi Jianrong, Xiang Zhenqun. 2020. Petrogenesis of the ~2.03 Ga meta–garnet granite in the Huai'an Complex of the North China Craton: Further evidence on a Paleoproterozoic rift–related tectonic regime[J]. *Geological Survey and Research*, 43(2): 114–126 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lili, Jiang Sihong, Leon Bagasa, Liu Yifei. 2019. The Triassic Bilugangan deposit: Geological constraints on the genesis of one of the oldest Mo deposits in Inner Mongolia, China[J]. *Ore Geol. Rev.*, 107: 837–852.
- Zhang Lili, Jiang Sihong, Li Hongmei, Wu Di, Kang Huan. 2019. Metallogenic and petrogenic geochronology and geochemical features of the ore–related granite in the Sadaigoumen Mo Deposit, Fengning, Hebei Province[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 40(5): 708–724 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Mingyu, Li Tiegang, Chen Gongzheng, Wu Xiaoguang, Zhao Zheng, Huang Fan, Wu Hao, Wang Guorui, Xu Liquan and Zhang Tong. 2018. Diagenetic and metallogenic ages of Quanzigou porphyry molybdenum deposit in Fengzhen City, Inner Mongolia, and their geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 28(2): 339–354 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Tong, Chen Zhiyong, Xu Liquan, Chen Zhenghui. 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): 279–282 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yulian, Xu Rongke, Shan Liang, Jia Qunzi, Song Zhongbao, Chen Xiangyang, Zhang Xiaofei, Chen Bo, Li Yazhi, Quan Shoucun. 2012. Rock–forming and ore–forming ages of the Xiaohulishan molybdenum deposit in Beishan area, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(2): 469–475 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhenjie, Cheng Qiuming, Wu Guopeng, Hu Xinlu. 2020. Petrogenesis of the Quanzigou porphyry Mo deposit at the northern margin of the North China Craton: Constraints from geochronology, geochemistry, and Sr–Nd–Hf isotopes characteristics[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106681>.
- Zhang Zunzhong, Wu Changzhi, Gu Lianxing, Feng Hui, Zheng Yuanchuan, Huang Jianhua, Li Jing, Sun YaLi. 2009. Molybdenite Re–Os dating of Xintaimen molybdenum deposit in Yanshan–Liaoning metallogenic belt, North China[J]. *Mineral Deposits*, 28(3): 313–320 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Taiping, Xu Yonghang, Zhai Mingguo. 2007. Petrogenesis and tectonic setting of the Paleoproterozoic Xiong'er Group in the Southern Part of the North China Craton: A Review[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2: 191–206 (in Chinese with English abstract).
- Zhe Meng, Hu Jianzhong, Zhou Wei, Ding Haiyang. 2014. Geological characteristics and molybdenite Re–Os isotopic dating of Antuoling molybdenum deposit in Hebei Province[J]. *Geoscience*, 28(2): 339–347 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Tiancheng, Zeng Qingdong, Chen Peiwen, Li Xiangzi, Cen Chaozheng, Yang Yueheng. 2019. The formation of the Caosiyao giant porphyry Mo deposit on the northern margin of the North China Craton: Constraints from U–Pb and Re–Os geochronology, whole–rock geochemistry, Hf isotopes, and oxygen fugacity of the magma[J]. *Geological Journal*, 54(4): 2160–2184.
- Zou Tao, Wang Jingbin, Wang Yuwang, Yuan Jiming, Lin Longjun, Dou Jinlong, Jiang Wei, Li Wei, Ma Xinghua. 2011. Geological characteristics and genesis of the Aolunhua Porphyry Mo–Cu Deposit, Inner Mongolia[J]. *Geology and Prospecting*, 47(5): 737–747 (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): 64–38.
- 蔡明海, 彭振安, 屈文俊, 贺钟银, 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.
- 陈衍景, 富士谷, 强立志. 1992. 评熊耳群和西阳河群形成的构造背景[J]. *地质论评*, 38(4): 325–333.
- 陈毓川, 王登红, 李厚民. 2010. 重要矿产预测类型划分方案[M]. 北京: 地质出版社, 1–183.
- 代军治. 2008. 燕辽成矿带钼(铜)矿床成矿作用及成矿动力学背景[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 邓小华, 姚军明, 李晶, 孙亚莉. 2009. 东秦岭寨凹钼矿床辉钼矿 Re–Os 同位素年龄及熊耳期成矿事件[J]. *岩石学报*, 25(11): 2739–2746.

- 丁正江, 孙丰月, 刘建辉, 刘殿浩, 李碧乐, 张丕建, 钱焯, 李杰. 2012. 胶东邢家山钨矿床辉钨矿 Re-Os 同位素测年及其地质意义[J]. 岩石学报, 28(9):2721-2732.
- 董朋生, 董国臣, 孙转荣, 李华伟, 王树树, 王伟清, 耿建珍. 2018. 燕山地区寿王坟杂岩体锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素和地球化学特征及其地质意义[J]. 地学前缘, 25(6):264-276.
- 段士刚, 薛春纪, 刘国印, 燕长海, 冯启伟, 宋要武, 涂其军, 高永宝, 高炳宇. 2010. 河南栾川地区铅锌矿床地质和硫同位素地球化学[J]. 地学前缘, 17(2):375-384.
- 范羽, 周涛发, 张达玉, 袁峰, 范裕, 任志, Noel White. 2014. 中国钨矿床的时空分布及成矿背景分析[J]. 地质学报, 88(4): 784-804.
- 高阳, 毛景文, 叶会寿, 孟芳, 周珂, 高亚龙. 2010. 东秦岭外方山地区石英脉型钨矿床地质特征及成矿时代[J]. 矿床地质, 29: 189-190.
- 侯增谦, 杨志明. 2009. 中国大陆环境斑岩型矿床: 基本地质特征、岩浆热液系统和成矿概念模型[J]. 地质学报, 83(12):1779-1817.
- 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钨稀土元素成矿作用[J]. 矿床地质, 34(4):641-674.
- 黄典豪, 杜安道, 吴澄宇, 刘兰笙, 孙亚莉, 邹晓秋. 1996. 华北地台钨(铜)矿床成矿年代学研究——辉钨矿-钨年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 15(4):365-373.
- 李光耀, 李志丹, 王佳营, 李效广, 李超, 涂家润, 谢瑜, 丁宁. 2020. 内蒙古乌拉特后旗查干花钨矿锆石 U-Pb 和辉钨矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 现代地质, 34(3):494-503.
- 李厚民, 陈毓川, 叶会寿, 王登红, 郭保健, 李永峰. 2008. 东秦岭一大别地区中生代与岩浆活动有关钨(钨)金银铅锌矿床成矿系列[J]. 地质学报, 82(11):1468-1477.
- 李厚民, 叶会寿, 王登红, 陈毓川, 屈文俊, 杜安道. 2009. 豫西熊耳山寨凹钨矿床辉钨矿-钨年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 28(2): 133-142.
- 李怀坤, 张健, 田辉, 周红英, 相振群, 刘欢. 2020. 华北克拉通北缘燕辽裂陷槽中一新元古代地层年代学研究进展[J]. 地质调查与研究, 43(2):127-136.
- 李杰, 宋明春, 王美云, 李世勇, 周明岭, 倪师军, 张成江, 丁正江, 岳跃破. 2013. 胶东尚家庄钨矿床 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 中国地质, 40(5):1612-1621.
- 李锦轶. 2001. 中朝地块与扬子地块碰撞的时限与方式——长江中下游地区震旦纪—侏罗纪沉积环境的演变[J]. 地质学报, 75(1): 25-34.
- 李靖辉. 2014. 河南嵩县大石门沟钨矿床辉钨矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 中国地质, 41(4):1364-1374.
- 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. 2016a. 内蒙古阿巴嘎旗比鲁干干斑岩型钨矿床辉钨矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 35(4):519-523.
- 李俊建, 周勇, 党智财, 赵泽霖, 李超, 屈文俊, 曹子存, 杨国建, 付超, 唐文龙. 2016b. 内蒙古化德县三胜钨矿床辉钨矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 35(4):531-536.
- 李诺, 孙亚莉, 李晶, 李文博. 2007. 内蒙古乌努格吐山斑岩铜钨矿床辉钨矿-钨年龄及其成矿地球动力学背景[J]. 岩石学报, 23(11):2881-2888.
- 李诺, 孙亚莉, 李晶, 薛良伟, 李文博. 2008. 小秦岭大湖金钨矿床辉钨矿-钨同位素年龄及印支期成矿事件[J]. 岩石学报, 24(4):810-816.
- 李永峰, 王春秋, 白凤军, 宋艳玲. 2004. 东秦岭钨矿 Re-Os 同位素年龄及其成矿动力学背景[J]. 矿产与地质, 18(6):571-578.
- 李正远, 叶会寿, 贺文, 曹晶, 张兴康, 王赛, 路东宇, 李超. 2014. 冀东唐杖子金(钨)矿床地质特征及辉钨矿 Re-Os 同位素年龄[J]. 矿床地质, 33(6):1366-1378.
- 刘军, 武广, 王峰, 罗大锋, 胡妍青. 2013. 大兴安岭北段岔路口斑岩钨矿床成矿年代学、岩石地球化学及其地质意义[J]. 矿床地质, 32(6):1093-1116.
- 刘舒波, 李超, 岑况, 屈文俊. 2012. 含辉钨矿全岩样品 Re-Os 同位素定年研究: 在北京大庄科钨矿床中的应用[J]. 现代地质, 26(2): 254-260.
- 刘勇, 聂凤军, 刘翼飞, 侯万荣. 2012. 内蒙古宝格达乌拉钨(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.
- 卢仁, 梁涛, 罗照华, 樊秉鸿. 2013. 北太行山安妥岭斑岩钨矿 Pb 同位素组成及地质意义[J]. 矿产与地质, 27(1):83-88.
- 罗铭玖, 张辅民, 董群英, 许永仁, 黎世美, 李昆华. 1991. 中国钨矿床[M]. 郑州:河南科学技术出版社. 425.
- 马星华, 陈斌, 赖勇, 鲁颖淮. 2009. 内蒙古敖伦花斑岩钨矿成矿年代学及地质意义[J]. 岩石学报, 25(11):2939-2950.
- 毛冰, 叶会寿, 李超, 肖中军, 杨国强. 2011. 豫西夜长坪钨矿床辉钨矿-钨同位素年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 30(6):1069-1074.
- 孟树, 闫聪, 赖勇, 舒启海, 孙艺. 2013. 内蒙古车户沟钨铜矿成矿年代学及成矿流体特征研究[J]. 岩石学报, 29(1):255-269.
- 聂凤军, 江思宏, 赵省民, 白大明, 刘妍, 赵月明, 王新亮, 苏新旭. 2002. 内蒙古流沙山金(钨)矿床地质特征及矿床类型的划分[J]. 地质地球化学, 1:1-7.
- 聂凤军, 张可, 刘翼飞, 江思宏, 刘勇. 2011. 华北克拉通北缘及邻区印支期岩浆活动与钨和金成矿作用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 41(6):1651-1666.
- 聂凤军, 张万益, 杜安道, 江思宏, 刘妍. 2007. 内蒙古小东沟斑岩型钨矿床辉钨矿-钨同位素年龄及其地质意义[J]. 地质学报, (7): 36-43.
- 彭振安, 李红红, 屈文俊, 张诗启, 丁海军, 陈晓日, 张斌, 张永正, 徐明, 蔡明海. 2010. 内蒙古北山地区小狐狸山钨矿床辉钨矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 29(3): 510-516.
- 秦臻, 戴雪灵, 邓湘伟. 2012. 东秦岭秋树湾铜钨矿流体包裹体和稳定同位素特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 31(2): 323-336.
- 舒启海, 蒋林, 赖勇, 鲁颖淮. 2009. 内蒙古阿鲁科尔沁旗敖伦花斑岩铜钨矿床成矿时代和流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 25 (10): 2601-2614.
- 陶继雄, 王翌, 陈郑辉, 唐伟, 王任飞. 2017. 内蒙古乌兰德勒钨铜多金属矿区细粒二长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及意义[J]. 地质通报, 36(9): 1525-1530.
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 徐志刚, 盛继福, 朱明玉, 刘喜方, 张长青, 王成辉, 王永磊. 2013. 矿产预测类型及其在矿产资源潜力评价

- 中的运用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 43(4): 1092-1099.
- 王圣文, 王建国, 张达, 祁小军, 吴淦国, 赵丕忠, 杨宗锋, 刘彦兵. 2009. 大兴安岭太平沟钼矿床成矿年代学研究[J]. 岩石学报, 25(11): 2913-2923.
- 王智, 王惠初, 施建荣, 常青松, 张家辉, 任云伟, 相振群. 2020. 内蒙古集宁地区徐武家变质辉长岩的形成背景及其地质意义[J]. 地质调查与研究, 43(2): 97-113.
- 魏庆国, 姚军明, 赵太平, 孙亚莉, 李晶, 原振雷, 乔波. 2009a. 东秦岭发现~1.9Ga钼矿床—河南龙门店钼矿床Re-Os定年[J]. 岩石学报, 25(11): 2747-2751.
- 魏庆国, 原振雷, 姚军明, 陈伟, 乔波, 赵太平. 2009b. 东秦岭钼矿带成矿特征及其与美国克莱马克斯—亨德森钼矿带的对比[J]. 大地构造与成矿学, 33(2): 259-269.
- 翁海蛟, 韦龙明. 2014. 内蒙古车户沟斑岩型铜钼矿区矿石特征及成因探讨[J]. 西部资源, 126-129.
- 吴昊, 吴广, 陶宏, 王国瑞, 李铁钢, 陈隽琪, 杨宁宁. 2014. 内蒙古卓资县大苏计斑岩型钼矿床辉钼矿Re-Os同位素年龄及流体包裹体研究[J]. 矿床地质, 33(6): 1251-1267.
- 相振群, 陆松年, 李怀坤, 田辉, 刘欢, 张阔. 2020. 华北克拉通中元古代岩浆事件群[J]. 地质调查与研究, 43(2): 137-152.
- 向君峰, 裴荣富, 叶会寿, 王春毅, 田志恒. 2012. 南泥湖—三道庄钼(钨)矿床成矿流体的碳氢氮同位素研究及其启示[J]. 中国地质, 39(6): 1778-1789.
- 徐焱, 张世红. 2020. 塔里木克拉通在Rodinia中的位置——研究进展与问题[J]. 地质调查与研究, 43(2): 169-176.
- 杨梅珍, 曾键年, 任爱群, 陆建培, 潘思东. 2011. 河南罗山县母山钼矿床成矿作用特征及锆石LA-ICP-MS U-Pb同位素年代学[J]. 矿床地质, 30(3): 435-447.
- 杨梅珍, 曾键年, 覃永军, 李法岭, 万守权. 2010. 大别山北缘千鹅冲斑岩型钼矿床锆石U-Pb和辉钼矿Re-Os年代学及其地质意义[J]. 地质科技情报, 29(5): 35-45.
- 杨泽强. 2007. 河南商城县汤家坪钼矿辉钼矿铼-钨同位素年龄及地质意义[J]. 矿床地质, 3: 289-295.
- 叶会寿, 毛景文, 李永峰, 郭保健, 张长青, 刘珺, 闫全人, 刘国印. 2006. 东秦岭东沟超大型斑岩钼矿SHRIMP锆石U-Pb和辉钼矿Re-Os年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 80(7): 1078-1088.
- 叶天竺. 2013. 矿床模型综合地质信息预测技术方法理论框架[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 43(4): 1053-1072.
- 张家辉, 王惠初, 郭敬辉, 田辉, 任云伟, 常青松, 施建荣, 相振群. 2020. 华北克拉通怀安杂岩中~2.03 Ga变质石榴花岗岩的成因其对古元古代裂谷事件的制约[J]. 地质调查与研究, 43(2): 114-126.
- 张莉莉, 江思宏, 李红梅, 吴迪, 康欢. 2019. 河北丰宁撒岱沟门钼矿床成矿年代学及成矿岩体地球化学特征[J]. 地球学报, 40(5): 708-724.
- 张明玉, 李铁刚, 陈公正, 吴晓光, 赵正, 黄凡, 吴昊, 王国瑞, 许立权, 张彤. 2018. 内蒙古丰镇市泉子沟斑岩钼矿床成矿年代学及其地质意义[J]. 矿床地质, 28(2): 339-354.
- 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铼-钨同位素定年及其地质意义[J]. 岩矿测试, 28(3): 279-282.
- 张雨莲, 许荣科, 陕亮, 贾群子, 宋忠宝, 陈向阳, 张晓飞, 陈博, 栗亚芝, 全守村. 2012. 内蒙古北山地区小狐狸山钼矿辉钼矿Re-Os年龄和LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄[J]. 地质通报, 31(2): 469-475.
- 张遵忠, 吴昌志, 顾连兴, 冯慧, 郑远川, 黄建华, 李晶, 孙亚莉. 2009. 燕辽成矿带东段新台门钼矿床的Re-Os同位素年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 28(3): 313-320.
- 赵太平, 徐勇航, 翟明国. 2007. 华北陆块南部元古宙熊耳群火山岩的成因与构造环境: 事实与争议[J]. 高校地质学报, 13(2): 191-206.
- 者萌, 胡建中, 周伟, 丁海洋. 2014. 河北省安妥岭钼矿床地质特征及辉钼矿Re-Os同位素年龄[J]. 现代地质, 28(2): 339-347.
- 祝少辉. 2015. 东秦岭—大别山钼多金属成矿带成矿规律与找矿方向探讨[J]. 资源导刊: 地球科技版, 15-19.
- 邹滔, 王京彬, 王玉往, 袁继明, 林龙军, 窦金龙, 蒋伟, 李伟, 马星华. 2011. 内蒙古敖仑花斑岩型钼铜矿床地质特征及成因探讨[J]. 地质与勘探, 47(5): 737-747.