

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.522>



# 西大别白垩纪两阶段花岗岩成岩及钼成矿作用的讨论

陈伟<sup>1</sup>,毛景文<sup>1</sup>,徐兆文<sup>2</sup>,曲晓明<sup>1</sup>,于旸<sup>3</sup>

1.中国地质科学院矿产资源研究所,自然资源部成矿作用和资源评价重点实验室,北京 100037

2.南京大学地球科学与工程学院,江苏南京 210093

3.自然资源部经济研究院,河北廊坊 065200

**摘要:**系统总结西大别白垩纪赋钼花岗岩的岩石成因,并结合这些岩体的岩石地球化学特征对西大别钼矿床形成条件进行探讨,对认识西大别钼成矿带的地球化学动力学背景具有重要意义。在白垩纪时期,西大别含钼花岗岩成岩作用与东大别地区相似,可分为早、晚两个阶段。早阶段岩体(早于 132 Ma)形成于加厚地壳环境,晚阶段岩体(晚于 130 Ma)形成于非加厚地壳环境。这种岩石成因上的差别是导致该地区钼矿成矿条件差异的根本原因。结合钼元素的地球化学属性和中央造山带的演化特征,认为晚古生代时期位于造山带南侧的古秦岭洋可能为地壳中 Mo 元素在表生风化过程中提供有利的沉积环境,并且在三叠纪时期伴随扬子板块一起俯冲到华北板块之下,富钼沉积物与扬子地壳一起部分熔融形成富钼的岩浆,最终形成西大别白垩纪时期大规模的含钼成岩作用。

**关键词:**西大别造山带;加厚下地壳;钼成矿作用;白垩纪花岗岩;岩石学。

中图分类号: P611

文章编号: 1000—2383(2018)12—4638—13

收稿日期: 2018—04—24

## Two Stages of Cretaceous Granitic Magmatism and Mo Mineralizations in West Dabie Orogenic Belt

Chen Wei<sup>1</sup>, Mao Jingwen<sup>1</sup>, Xu Zhaowen<sup>2</sup>, Qu Xiaoming<sup>1</sup>, Yu Yang<sup>3</sup>

1. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Natural Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China

3. Economic Research Institute, Ministry of Natural Resources, Langfang 065200, China

**Abstract:** This paper investigates the petrogenesis of the Cretaceous Mo-bearing granites in West Dabie orogenic belt. Utilizing the rock geological chemistry of these granites, the formation condition of the Mo deposits in West Dabie orogen is discussed, which is significant to recognize the geochemical dynamics background of West Dabie Mo metallogenetic belt. Similar to the Cretaceous granites in East Dabie orogen, the magmatism of Mo-bearing granites in West Dabie orogen could be divided into two stages. The early stage was formed under thickened crustal environment, and the late stage was formed under non-thickened crustal environment. This is fundamental reason to decide the differences of the Mo metallization in West Dabie orogen. Combining with the geochemical characteristics of the Mo and the evolutionary process of central orogenic belt, the Qinling paleo-oceanic basin probably offered a favorable environment for the supergene weathering crustal Mo element, and then the Mo enriched sediment was carried by the Yangtze block and subducted underneath the North China block. Together with the Yangtze block, the Mo enriched sediment was partial melted, forming the large-scale Mo-bearing magmatism in West Dabie orogen.

**Key words:** West Dabie orogen; thickened lower crust; molybdenum mineralization; Cretaceous granite; petrology.

---

基金项目:中国地质调查局项目(No.DD20160026)。

作者简介:陈伟(1984—),男,博士,主要从事花岗岩的岩石成因及相关成矿作用的研究工作.E-mail: nmgchenwei@163.com

引用格式:陈伟,毛景文,徐兆文,等,2018.西大别白垩纪两阶段花岗岩成岩及钼成矿作用的讨论.地球科学,43(12):4638—4650.

## 0 引言

大别造山带是三叠纪华南陆块俯冲进入华北陆块之下形成的大陆碰撞型造山带(从柏林,1996; Li *et al.*, 1999; 郑永飞,2008).在早白垩世,可能受太平洋板块后撤作用的影响,造山带由挤压转换为伸展环境,热地幔物质上涌,加厚造山带被活化,发生了拉张垮塌并形成大量碰撞后岩浆岩(Wu *et al.*, 2005; 吴福元等,2008),这些岩浆活动是造山带岩石圈深部热状态和结构发生变化的响应,因此,研究造山带碰撞后岩浆岩的形成时代、岩石成因及地球动力学背景,是认识俯冲大陆岩石圈再循环和碰撞造山带构造演化的关键,是研究造山带岩石圈深部热状态、结构和组成的理想对象(赵子福和郑永飞,2009).前人对东大别地区白垩纪花岗岩进行了大量深入的研究,其中部分学者认为它们来自俯冲扬子地壳的部分熔融(Chen *et al.*, 2002; Zheng *et al.*, 2003, 2004, 2006; Zhao *et al.*, 2007; Huang *et al.*, 2007),另一部分学者把大别杂岩(包括大别片麻岩和榴辉岩)作为花岗岩的源区(Ma *et al.*, 1998; Zhang *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2007, 2013),而大别杂岩又被许多学者认为是深俯冲扬子板块折返的产物(Zheng *et al.*, 2006; Zhao *et al.*, 2008),从这点上来说以上两种源区说法是一致的.东大别白垩纪花岗岩的形成可以分为两个阶段:早阶段为132 Ma左右含角闪石片麻状构造花岗岩,被认为是地壳物质在深度大于50 km的加厚下地壳发生部分熔融的产物;晚阶段为128 Ma以后不含角闪石的块状构造的花岗岩,被认为是地壳物质在小于35 km的下地壳发生部分熔融的产物(Xue *et al.*, 1997; Hacker *et al.*, 1998; 薛怀民等, 2002; 马昌前等, 2003; Bryant *et al.*, 2004; Zhao *et al.*, 2004, 2007; Xie *et al.*, 2006; Xu *et al.*, 2007).笔者在西大别白垩纪花岗岩的研究过程中发现,西大别也存在与东大别类似的成岩过程,也分为加厚下地壳和非加厚下地壳两个阶段(Chen *et al.*, 2015).

西大别造山带是我国一条重要的钼多金属成矿带,与东秦岭相连构成中国最大的钼成矿带,拥有钼资源储量超过 $8 \times 10^6$  t,占中国钼资源储量的66%(Mao *et al.*, 2011).近年来西大别及相邻地区相继发现多处钼矿床,自西向东依次有肖畈、母山、千鹅冲、宝安寨、大银尖、姚冲、汤家坪和沙坪沟等钼矿床.这些钼矿床除大银尖矿床为斑岩型—矽卡岩型矿床,其他都是斑岩型矿床,与区内广泛分布的白垩世花岗岩

紧密相关.前人对这些矿床的成矿年龄(辉钼矿 Re-Os 定年)、矿床地质特征进行了详实的研究工作(邱顺才, 2006a, 2006b; 郭铁朋, 2007; 杨泽强, 2007a, 2007b; 魏庆国等, 2010; 杨梅珍等, 2011; 孟祥金等, 2012; 李毅等, 2013),但在成矿岩体岩石成因、钼的成矿物质来源方面缺乏深入研究和讨论.本文拟在前人的研究基础上,选择西大别及邻区近10个钼矿床及成矿岩体,来讨论西大别地区白垩纪时期花岗岩的成岩作用及钼成矿作用,尤其是利用含矿岩体的岩石成因来讨论钼矿形成的条件及物质来源.

## 1 区域地质背景

秦岭大别造山带夹持在华北克拉通和扬子克拉通之间,其北以栾川—明港—固始深大断裂带与华北克拉通为界,南以勉略—襄樊—广济深大断裂带与扬子克拉通为界,是一个经历长期多次不同造山作用而形成的复合型大陆造山带(张国伟等,1996).在信阳以东的大别山造山带可以分为东、西大别造山带两个部分,西大别造山带西以大悟断裂为界与秦岭造山带相邻,东大别造山带东以郯庐断裂为界与苏鲁造山带相邻,东西大别造山带中间以商麻断裂为界(图1).区域基本构造格架表现为北西西向展布的强变形断裂带或韧性剪切带与由它们分隔、夹持的弱变形域变质地体相间排列的特征.强变形的断裂带或韧性剪切带控制着区域构造的展布方向.弱变形域变质地体为形成于不同时代、具有不同建造特征和变质变形历史的构造岩石单元.晚期的北东—北北东向脆性断裂又截切了北西西向的强变形带和弱变形域变质地体,形成网格状构造系统.

研究区强变形断裂带呈近北西向展布,主要为区域性的大断裂带.区域性深大断裂带由北向南依次为:栾川—明港—固始断裂带、龟山—梅山断裂带、桐柏—商城断裂带、定远—八里畈断裂带.另外,研究区内北东—北北东向脆性断裂也较发育,截切了北西西向的强变形带和弱变形域变质地体.该类断裂自西向东主要有大悟—涩港断裂、陡山河断裂、商城—麻城断裂等,以大致50 km等间距平行分布.北北东向断裂及其与近东西向断裂复合部位,除控制灵山、新县、商城三大花岗岩基的产出外,还控制了大别山北麓中酸性小岩体的侵位和形态(杨泽强, 2007b).弱变形域变质地体由北向南依次为北秦岭亚带的寒武系二郎坪群、下元古界秦岭岩群,南秦岭亚带的中元古界龟山岩组、泥盆系南湾组、古生界定

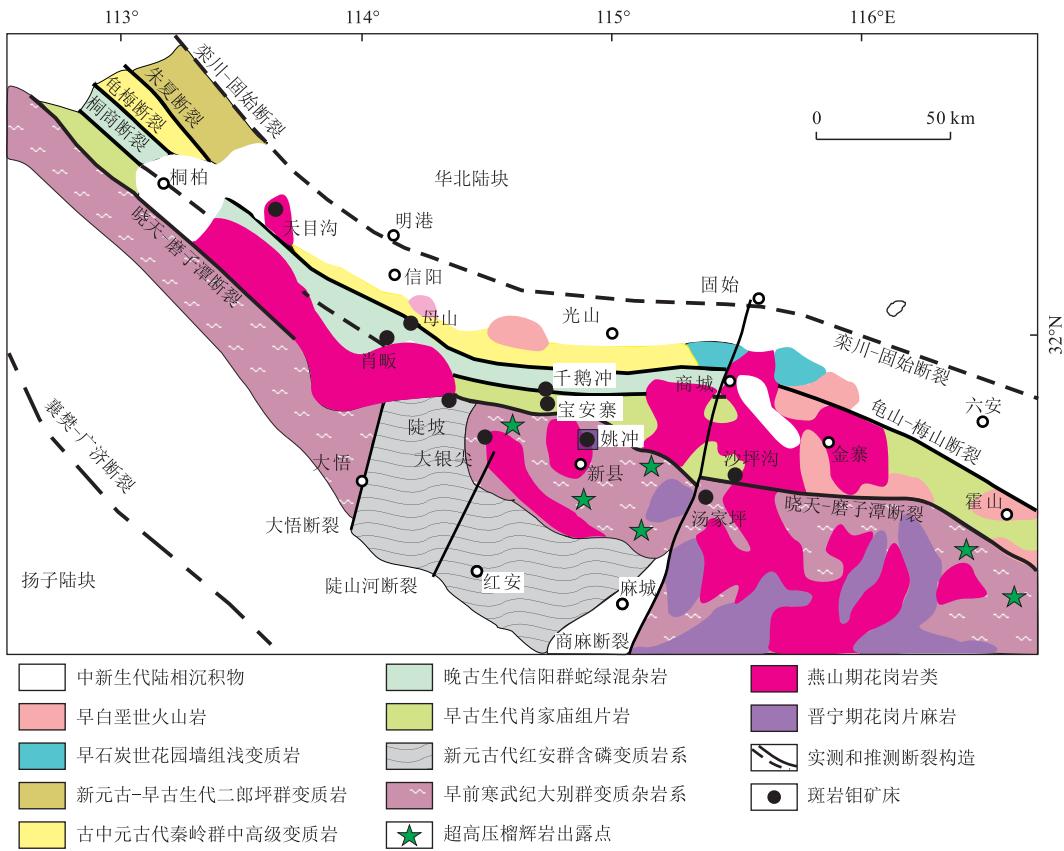


图 1 大别造山带钼矿空间分布

Fig.1 Schematic map showing the geology and distribution of the Mo deposits in Dabie orogen  
据王运等(2009)修改

远组、震旦系一下奥陶统肖家庙岩组、中元古界浜湾岩组、上太古界一下元古界大别变质杂岩等构造岩石单元。

西大别造山带后碰撞岩浆活动频繁,各个地质时期均有不同程度的岩浆活动.其中中生代白垩纪酸性侵入岩最为发育,大的花岗岩基主要有灵山岩体、新县岩体和商城岩体等,沿桐一商断裂分布.小的花岗岩岩体更是数量众多,如汤家坪、大银尖、母山、亮山等,是研究区内钼多金属的主要成矿母岩,也是本次工作的主要研究对象.另外,区内有少量元古代中基性火山岩和古生代中基性侵入岩活动.

## 2 西大别钼矿及成矿岩体的时空分布

西大别及邻区目前已发现大、中型钼矿床(点)10余个,自西向东依次为:天目沟、肖畈、母山、陡坡、大银尖、千鹅冲、宝安寨、姚冲、汤家坪、沙坪沟及银山.总体而言,这些钼矿床及成矿岩体具有如下特征:

(1)区域空间分布.大别山地区钼矿床及成矿岩

体西起河南省天目沟矿床,东至安徽省沙坪沟矿床,呈 NW 向狭长带状展布,长约为 300 km,宽为 20~40 km.区内多数矿床分布于晓天—磨子潭断裂和龟梅断裂所夹持的狭长区域内,如母山、肖畈、陡坡、千鹅冲、宝安寨和沙坪沟钼矿床(点).此外,还有天目沟钼矿产于龟梅断裂以北,大银尖、姚冲和汤家坪钼矿产于晓天—磨子潭断裂以南(图 1).

(2)成岩成矿时间分布.大别山北麓钼矿主要以斑岩型为主,也有少量矽卡岩及构造角砾岩型矿床,钼矿床与大别中生代花岗岩的成因关系密切,成矿与成岩的年龄一致或接近.大别山北麓钼成矿作用从 155 Ma 左右持续到 110 Ma 左右,其中,母山、陡坡及姚冲钼矿床形成早于 130 Ma,其余千鹅冲、大银尖、宝安寨、天目沟、银山、汤家坪及沙坪沟钼矿均形成于 130 Ma 以后(表 1).

## 3 成矿岩体的性质及成因

大别山北麓钼矿床多与早白垩世花岗质岩体密

表 1 西大别钼矿床及成矿岩体的形成年龄及地球化学特征  
Table 1 Ages and geochemical characteristics of the Mo deposits and ore-bearing plutons in West Dabie

矿床	矿床储量( $10^4$ t)	赋矿岩体	辉钼矿 Re-Os 年龄(Ma)	辉钼矿中 Re 含量( $10^{-6}$ )	成矿岩体锆石 U-Pb 年龄(Ma)	岩体(La/Yb) <sub>N</sub> 比值	资料来源
<b>早阶段加厚地壳环境</b>							
姚冲	4.9	戴咀隐伏岩体(二长花岗岩)	134.9±0.9	21.83~74.80 (43.68)	133.3±1.3	39.87~77.74 (51.95)	Chen <i>et al.</i> (2015)
母山	5.89	母山岩体(花岗斑岩)	155.7±5.1	109.3	142.0±1.8	32.13~68.69 (50.41)	李明立(2009)
陡坡	—	灵山岩体(二长花岗岩)	140.5±8.2	32.27	—	30.48~40.08 (35.28)	李明立(2009)
<b>晚阶段非加厚地壳环境</b>							
大银尖	2.15	大银尖岩体(二长花岗岩)	124.54±0.67	8.28~54.74 (35.18)	124.9±1.3	6.70~17.5 (11.32)	Li <i>et al.</i> (2012)
天目沟	—	天目沟岩体(钾长花岗岩)	121.6±2.0	13.89	—	—	杨泽强(2007a)
银山	—	银山岩体(二长花岗岩)	113.1±1.3	15.27~15.65 (15.46)	—	—	徐晓春等(2009)
汤家坪	23.5	汤家坪岩体(花岗斑岩)	113.1±7.0	4.45~11.94 (7.94)	121.6±46.6	18.12~23.52 (21.05)	杨泽强(2007b); 魏庆国等(2010)
千鹅冲	60	千鹅冲隐伏岩体(黑云母二长花岗岩、花岗斑岩)	129.4±1.5	7.65~27.54 (17.01)	130±2	27.12~32.43 (28.52)	Gao <i>et al.</i> (2014)
宝安寨	<5	宝安寨岩体(二长花岗岩)	122.5±2.7	5.69~10.97 (7.80)	123.2±1.1	—	Chen <i>et al.</i> (2013)
沙坪沟	220	沙坪沟隐伏岩体(花岗斑岩、二长花岗岩、石英正长岩)	113.6±1.7	2.42~15.65 (8.58)	121.5±1.3~122.51±0.81	16.6~21.7 (19.15)	孟详金等(2012)

注:“—”表示无明确数据;括号中的数据为平均值。

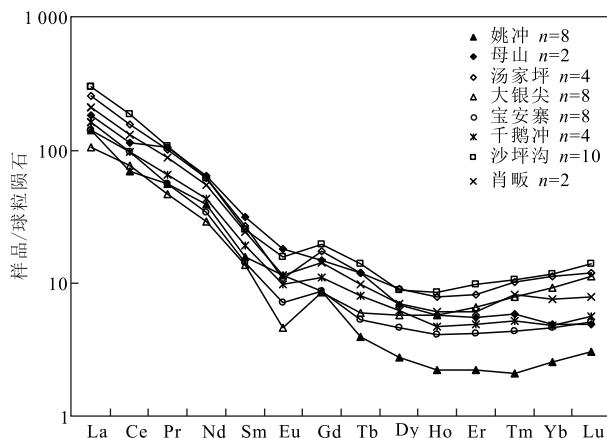


图 2 西大别典型钼矿床成矿岩体稀土元素球粒陨石标准化配分图

Fig.2 Chondrite-normalized rare earth elemental patterns of the Mo mineralization related stocks in West Dabie orogen

数据来源同表 1, 图中各元素含量取岩体的平均值, 标准化数据  
Sun and McDonough(1989)

切相关。成矿岩体多以椭圆形、长条形或不规则状的小岩株形式产出, 岩性以二长花岗岩、石英正长岩、钾长花岗岩为主, 且往往具有多期岩浆活动的特点(表 1)。岩体多属高钾钙碱性、准铝质—弱过铝质岩石, 以富集轻稀土元素和大离子亲石元素、亏损高场强元素为特征, 普遍具有高的( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub>、低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 以及 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 被认为是大别陆—陆造山带在碰撞造山后, 构造环境由挤压向拉伸转换过程中俯冲扬子陆壳部分熔融的产物(Chen *et al.*, 2002, 2013, 2015; Zhao *et al.*, 2004, 2005; Huang *et al.*, 2007; 郑永飞, 2008; 赵子福和郑永飞, 2009)。

实验岩石学工作已经证明在部分熔融过程中残留相和熔体的成分随着熔融的深度变化明显, 英云闪长岩—花岗质岩石部分熔融可以产生花岗质的熔体, 部分熔融过程中残留体组合受控于熔融的温度和压力, 如富钙斜长石+石英+斜方辉石+钛铁矿+黑云母残留相组合形成于压力小于 10 kPa 的环境中(Patiño Douce and Beard, 1995), 石榴石+斜辉石+石英+斜长石+斜方辉石+钾长石的残留相组合形成于压力为 12.5~15 kPa 的环境中(Patiño Douce and Beard, 1995; Skjerlie and Johnston, 1996; Litvinovsky *et al.*, 2000; Patiño Douce, 2005), 石榴石+斜辉石+石英/柯石英土富钠斜长石残留相组合形成于压力为 15~32 kPa 的环境中(Skjerlie and Johnston, 1996; Litvinovsky *et al.*, 2000; Patiño Douce, 2005)。这些残留相组合直接影响部分熔融岩浆微量元素的特征, 因此可以根据花岗岩稀土元素的特征大致反演岩浆形成的深度, 进而反演造山带加厚地壳厚度的变化和造山带的演化过程。前人根据东大别白垩纪花岗岩的微量元素特征的变化将它们分为早、晚两个阶段: 早阶段为 132 Ma 左右含角闪石片麻片状构造花岗岩, 它们表现出埃达克质岩的亲缘性, 显示明显的轻重稀土分馏, 极度亏损与石榴石相容的重稀土元素 Yb、Lu, 具有较高的 La/Yb 比值, 被认为是地壳物质在深度大于 50 km 的加厚下地壳发生部分熔融的产物; 晚阶段为 128 Ma 及以后的不含角闪石块状构造的花岗质岩, 它们显示相对弱的轻重稀土分馏, 且中重稀土分馏现象不明显, 重稀土元素 Yb、Lu 甚至有上翘的趋势, 具有相对较低的 La/Yb 比值, 被认为是地壳物质在小于 35 km 的下地壳发生部分熔融的产物(Xue

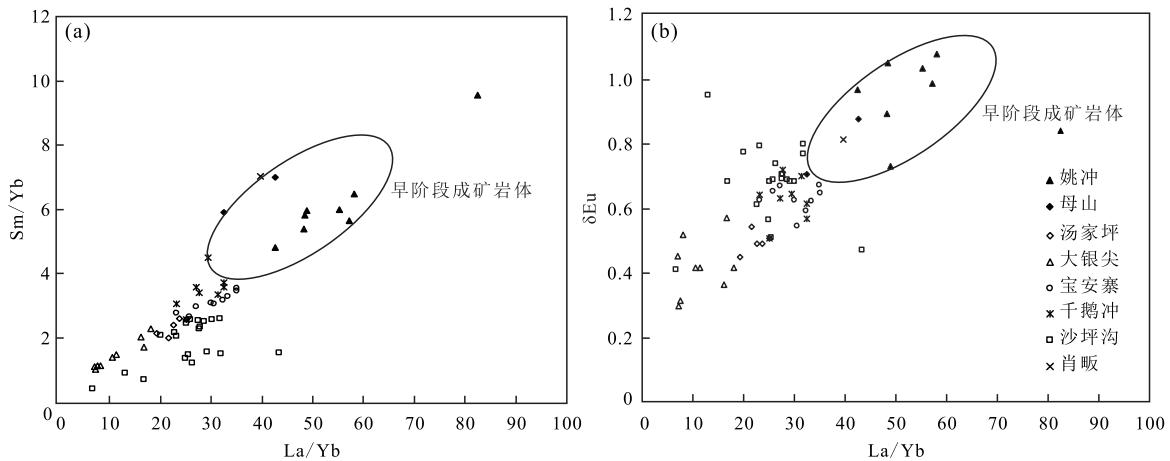


图 3 西大别钼矿成矿岩体 La/Yb-Sm/Yb (a) 及 La/Yb- $\delta\text{Eu}$  (b) 图解

Fig.3 La/Yb-Sm/Yb (a) 及 La/Yb- $\delta\text{Eu}$  (b) diagrams of the Mo mineralization related stocks in West Dabie orogen

数据来源同表 1

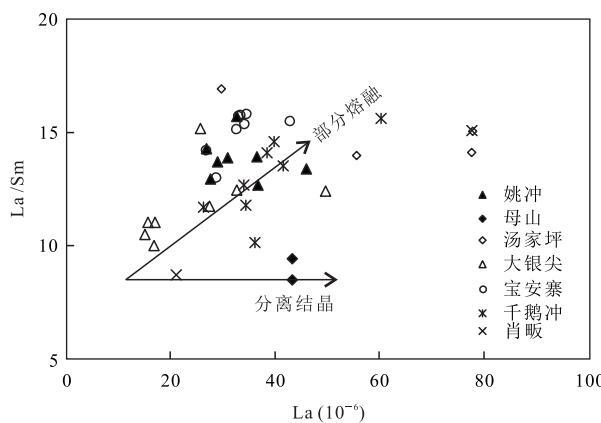


图 4 西大别钼矿成矿岩体 La—La/Sm 图解

Fig.4 La—La/Sm diagram of the Mo mineralization related stocks in West Dabie orogen

数据来源同表 1

*et al.*, 1997; Hacker *et al.*, 1998; 薛怀民等, 2002; 马昌前等, 2003; Bryant *et al.*, 2004; Zhao *et al.*, 2004 2007; Xie *et al.*, 2006; Xu *et al.*, 2007), 从而证明东大别造山带在早白垩世从挤压构造体制转换为拉伸构造体制, 造山作用形成的加厚下地壳发生垮塌减薄。我们对西大别及邻近区域 8 个成矿岩体进行对比研究发现, 成岩较早的母山和姚冲岩体微量元素特征与东大别早阶段白垩纪花岗岩一致, 在图 2 上, 母山和姚冲岩体显示更明显的轻重稀土分馏和微弱的 Eu 负异常, 而肖畈、大银尖、千鹅冲、宝安寨、汤家坪及沙坪沟则显示相对弱的轻重稀土分馏和明显的 Eu 负异常。在图 3a 中, 早阶段的成矿岩体相较晚阶段成矿岩体显示高的  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  及  $(\text{Sm}/\text{Yb})_{\text{N}}$  比值, 表明早阶段成矿岩体经历了更强的轻重、中重稀土分馏, 指示早阶段成矿岩体源区较深, 岩浆可能是含石榴石残留相部分熔融的产物, 而晚阶段的成矿岩体源区较浅, 可能是含角闪石残留相部分熔融的产物。在图 3b 中, 早阶段的成矿岩体的  $\delta\text{Eu}$  值较高, 大部分在 1 左右, 几乎不显示 Eu 的负异常; 而晚阶段成矿岩体  $\delta\text{Eu}$  值较低,  $\delta\text{Eu}$  值介于 0.3~0.8, 显示 Eu 的显著负异常, 表明晚阶段成矿岩体来自含斜长石残留相的部分熔融或者岩浆经历过斜长石的结晶分离。而在西大别成矿岩体 La—La/Sm 图解中(图 4), 这些花岗岩显示出清晰的部分熔融趋势, 表明晚阶段成矿岩体 Eu 的负异常可能主要受含斜长石残留相部分熔融的影响, 而晚阶段含矿岩体可能是更深的含石榴石残留相部分熔融的产物。综合以上微量元素地球化学特征, 西大别与钼成矿有关的成矿小岩体的岩石成因与东大别白垩纪花岗岩的一致, 也分为两个阶段: 早阶段母山和

姚冲成矿岩体形成于较深的加厚下地壳环境, 而晚阶段肖畈、大银尖、千鹅冲、宝安寨、汤家坪及沙坪沟成矿岩体则形成于较浅的非加厚下地壳环境。

#### 4 成岩物质来源及对钼来源的指示

前人认为自然界中 Re 主要富集于地幔中, 从幔源、壳幔混源到壳源, Re 含量分别从  $10^{-4}$  到  $10^{-5}$  再到  $10^{-6}$  逐数量级降低, 因此可以利用辉钼矿中 Re 的含量来示踪辉钼矿成矿物质的来源 (Mao *et al.*, 1999; Stein *et al.*, 2001)。元素地球化学研究表明, 辉钼矿中富集 Re 元素是因为  $\text{Re}^{4+}$  (7.1 nm) 与  $\text{Mo}^{4+}$  (7.3 nm) 有相近的原子半径和晶格常数, 很容易与辉钼矿中的 Mo 发生类质同象进入辉钼矿中, 而控制类质同象的因素除了元素离子浓度外还受到矿物形成时所处的物理化学条件的影响, 如温度、压力等 (Berzina *et al.*, 2005)。因此, 用辉钼矿中 Re 的含量来判断辉钼矿的源区时, 还需要结合成矿岩体的地球化学特征综合判断。

斑岩型矿床的成矿物质与岩体关系密切, 因此, 可以利用与成矿有关的岩体岩石成因、源区来判断矿体的成矿物质来源及成矿机制。前人对大别白垩纪花岗岩的研究表明, 它们主要来自俯冲扬子陆壳部分熔融的产物 (Chen *et al.*, 2002; Zheng *et al.*, 2003, 2004, 2006; Zhao *et al.*, 2007; Huang *et al.*, 2007)。Wang *et al.* (2012) 认为, 大别造山带在加厚下地壳阶段形成的花岗岩具有类似埃达克岩的性质, 如高的  $\text{Sr}/\text{Yb}$ 、 $\text{Sr}/\text{Y}$  比值, 低的 Yb 含量,

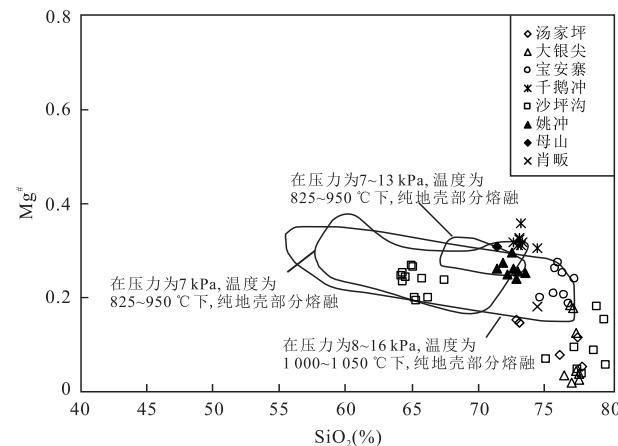
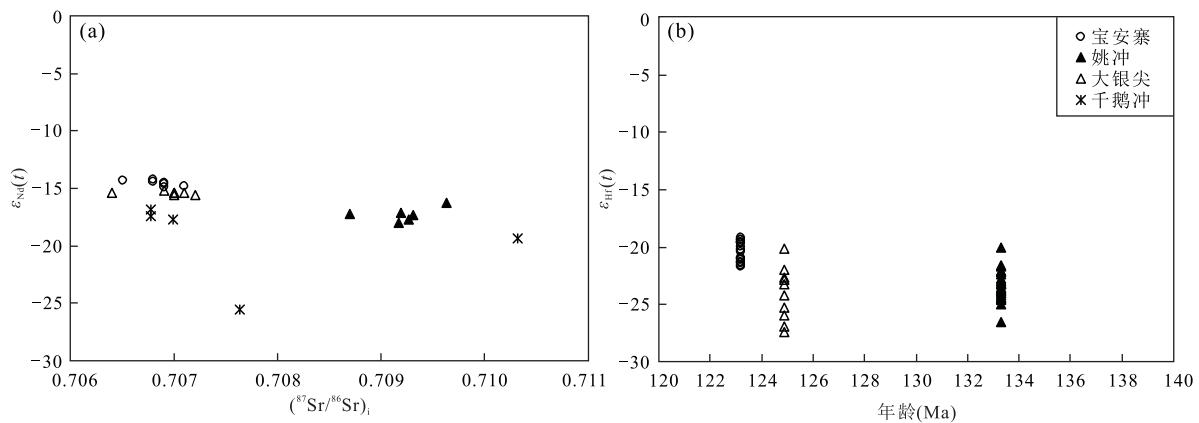
图 5 西大别钼矿床成矿岩体  $\text{SiO}_2-\text{Mg}^{\#}$  图解

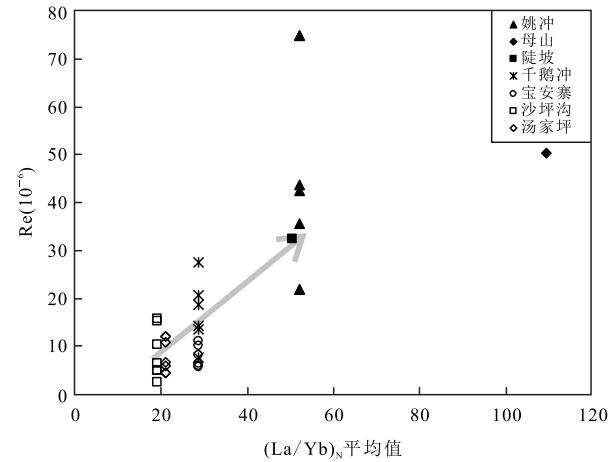
Fig.5  $\text{SiO}_2-\text{Mg}^{\#}$  diagram of the Mo mineralization related stocks in West Dabie orogen

数据来源同表 1

图 6 西大别钼矿成矿岩体  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ — $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (a) 及  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ —年龄(b)图解Fig.6  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ — $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (a) and  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ —age (b) diagrams of the Mo mineralization related stocks in West Dabie orogen数据来源同表 1,  $t = 130$  Ma

但它们又有别于经典的洋壳来源的埃达克岩,一般具有较低 MgO 及 Cr、Co 和 Ni 等相容元素含量,因此被认为是扬子下地壳在加厚下地壳环境下部分熔融形成的,未有地幔物质的参与. 我们对大别造山带北麓钼矿床的成矿岩体的 Mg 指数进行统计,结果表明这些岩体的 Mg 指数值都较低(低于 40),图 5 显示,纯地壳在不同条件下部分熔融的实验结果分别为:低 K 玄武岩在 8~16 kPa 和 1 000~1 050 °C 条件下脱水熔融形成纯地壳部分熔融熔体(Rapp and Watson, 1995);中等含水的中一高钾的玄武岩(1.7%~2.3% H<sub>2</sub>O)在 7 kPa 和 825~950 °C 条件下部分熔融(Sisson *et al.*, 2005);泥质岩在 7~13 kPa 和 825~950 °C 条件下部分熔融(Patiño-Douce and Johnston, 1991). 西大别各赋钼花岗岩岩体几乎都落到或低于纯地壳物质部分熔融的范围,表明成矿岩体主要来源于纯陆壳物质的部分熔融,而少有地幔物质的参与.

另外,这些成矿岩体一般都具有富集的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  以及  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值,它们的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值一般都低于 -15,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值一般都低于 -20(Li *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2013, 2015; Gao *et al.*, 2014),富集的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  以及  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值指示成矿岩体的源区为陆壳物质. 既然为钼矿提供成矿物质的成矿岩体来源于陆壳,那么辉钼矿中的 Re 也不太可能来自地幔. 辉钼矿中 Re 元素的含量可能受控于成矿岩体形成的压力和温度. 早阶段成矿岩体的岩浆作用形成于加厚下地壳环境,具有较深的成岩深度,具有较高的温度和压力,而晚阶段成矿岩体岩浆作用形成于非加厚地壳环境,岩浆形成的深度较浅,具有较低温度和压力. 在图 7 上,早阶段的成矿岩体一般具有较大的  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  平均值,

图 7 西大别钼矿成矿岩体 Re—(La/Yb)<sub>N</sub> 图解Fig.7 Re—(La/Yb)<sub>N</sub> diagram of the Mo mineralization related stocks in West Dabie orogen  
数据来源同表 1

$\text{Yb}$ )<sub>N</sub> 比值,形成辉钼矿中的 Re 元素的含量也更高,而晚阶段的成矿岩体一般具有较小的  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  比值,辉钼矿 Re 元素的含量也相对较低,在图 7 上,Re 的含量与  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  呈正的相关性. 因此,我们认为辉钼矿中 Re 含量可能与岩体岩浆作用的深度有关,指示它们可能更多受控于辉钼矿形成的温度和压力,温度和压力越大,Re 的元素地球活动性越强,更容易与 Mo 元素发生类质同象作用而进入到辉钼矿矿物中. 为了验证成矿岩体成岩温度对辉钼矿中 Re 元素含量影响,我们对西大别地区姚冲、母山、陡坡、汤家坪、大银尖、宝安寨、沙坪沟和千鹅冲成矿岩体的地球化学数据进行收集整理,并进行了锆石饱和温度的计算. 在  $M-T_{\text{zr}}$  图解上(图 8),早期的母山成矿岩体显示较高的成岩温度,而早期

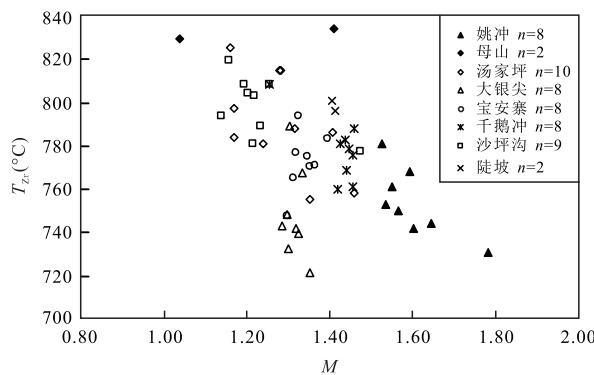
图 8 西大别钼矿成矿岩体  $M-T_{zr}$  图解

Fig.8  $M-T_{zr}$  diagram of the Mo mineralization related stocks in West Dabie orogen

数据来源同表 1

的姚冲花岗岩则显示较低的成岩温度;对于晚期成矿岩体它们的成岩温度变化范围为 720~820 °C。早期成矿岩体和晚期成矿岩体成岩温度并没有明显的差别,甚至同时代晚期成矿岩体的成岩温度变化也不一致,我们认为由于花岗岩主要是由陆壳中长英质的物质部分熔融形成的,而长英质的物质一般熔点较低,较容易在较低的温度条件下受热发生熔融。因此,造成花岗岩的部分熔融的温度不是绝对和深度相关,而辉钼矿中 Re 的含量也可能受花岗质岩浆部分熔融时的温度差异影响不大,可能主要受花岗岩形成压力的影响,但仍需要更多的工作来支持验证。

## 5 中央造山带的演化与成矿物质来源

Mo 作为一种稀有元素在地壳和地幔中丰度都很低,在上地壳中为  $1.1 \times 10^{-6}$ ,中下地壳中为  $0.6 \times 10^{-6}$ ,平均地壳为  $0.8 \times 10^{-6}$  (Rudnick and Gao, 2003),在洋壳中为  $1.3 \times 10^{-6}$ ,在原始地幔中也仅为  $0.05 \times 10^{-6}$ ,如果按照钼矿最低工业品位 0.06% 来计算,钼元素富集成矿须达到地壳丰度的 750 倍、地幔的 12 000 倍,一般来讲岩浆结晶分异作用对 Cu、Au 和 Mo 的富集作用小于 10 倍,而流体对 Mo 的富集作用约为 6 倍,显然无论地壳还是地幔都不可能仅通过岩浆或流体的富集作用形成钼矿。Scott *et al.* (2008) 发现在全球海洋还原沉积物中 Mo 的含量可以达到  $50 \times 10^{-6}$ ,尤其在寒武纪(550 Ma)全球大氧化事件发生以后,大气中氧含量的增加使得富含有机物沉积物中的钼含量大幅度升高,可以高达数百个  $10^{-6}$  数量级,比地壳的丰度高数百倍,从

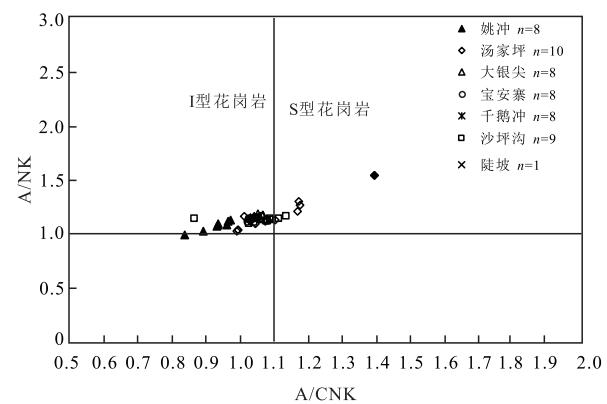


图 9 西大别钼矿成矿岩体 A/CNK-A/NK 图解

Fig.9 A/CNK-A/NK diagram of the Mo mineralization related stocks in West Dabie orogen

数据来源同表 1

理论上来讲可以通过岩浆或流体作用富集形成钼矿。孙卫东等(2015)也认为,钼是变价元素,在寒武纪大气氧再次升高以后,钼在地表化学风化过程中容易被氧化为水溶性的  $\text{MoO}_4^{2-}$ ,进入地表径流和海洋湖泊中,并且在还原条件下进入富含有机质的黑色页岩等沉积物(岩)中。富钼沉积物(岩)在随板块俯冲到地幔或深埋等环境中时可以因升温变质,进而发生部分熔融,形成富钼的原始岩浆。

这套地表的富钼沉积物(岩)伴随着板块俯冲到华北板块之下,重熔后随着岩浆作用在地表形成斑岩—矽卡岩型钼矿床,因此含矿花岗岩中应该有上地壳源区属性。但是根据扬子和华北陆块陆—陆碰撞的特点我们可以知道,扬子俯冲到华北板块之下的是扬子岩石圈地幔及以上的刚性部分,而不仅仅是上地壳,甚至在俯冲板块发生部分熔融的时候是优先熔融岩石圈地幔和扬子下地壳的物质(俯冲得更深,更接近热源),所以形成的岩浆岩的主要源区可能还是扬子下地壳或者更深的部位。尽管如此,秦岭一大别富钼花岗岩还是显示了一些 S 型到 I 型花岗岩过渡的特征,Bao *et al.* (2017) 对秦岭一大别富钼花岗岩的铝饱和指数进行了统计,在 A/CNK-A/NK 图解上很多岩体的 A/CNK 值都超过 1.1,岩石属于过铝质的花岗岩。我们在西大别含钼花岗岩的研究过程中也发现了类似的问题,很多花岗岩的岩石成因不好厘定,A/CNK 值在 1.1 左右,标准矿物 CIPW 计算的刚玉分子含量也在 1% 左右,岩石属于 I-S 过渡型花岗岩(图 9),这些证据可能都是暗示了西大别地区富钼花岗岩的源区可能既有下地壳又有上地壳的物质,但总体来看西大别白垩纪富

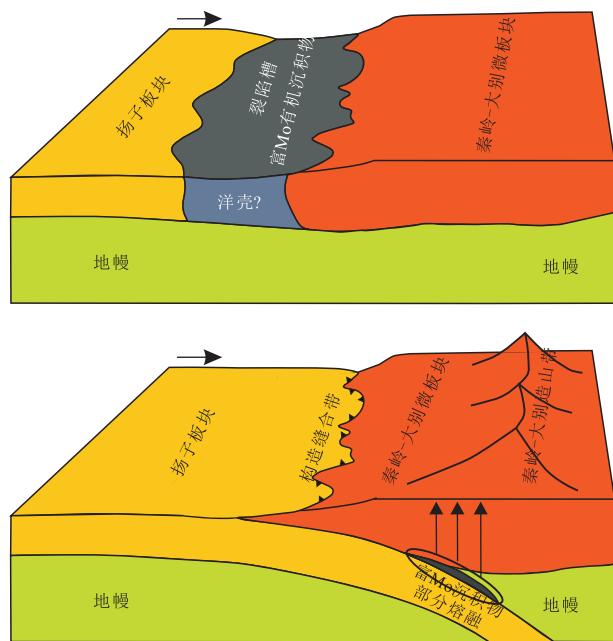


图 10 西大别钼矿成矿模式

Fig.10 Metallogenetic model of the Mo deposits in West Dabie orogen

钼花岗岩的岩石成因类型还是更偏向 I 型花岗岩,它们的源区可能更多为扬子下地壳,上地壳中的表生风化作用形成的富钼沉积物在决定岩石成因的作用中不起主导地位。

结合中央造山带的构造演化历史,我们认为中央造山带的演化过程符合上述成矿模型需要的地质条件。中央造山带(秦祁昆、大别—苏鲁)夹持于华北和华南板块之间,它的原型不是一条简单的海洋,而是由一系列微板块加上位于其南北两侧不同时期的小洋盆组成。微板块群的主体是柴达木、秦岭、大别、苏鲁以及中祁连,它们以浅海相和陆相沉积为特点。元古代末期至早古生代早期,北侧拉张成多岛小洋盆,它们在加里东末期关闭,并在微板块群北缘形成前陆盆地带。南侧形成裂陷槽,在加里东末期关闭,一般不造山(殷鸿福和张克信,1998; 张思敏等,2014)。在晚古生代,微板块群已与欧亚板块合为一体,并总体北移,在此过程中,沿这一微板块群的南缘,出现晚泥盆世(秦岭勉略带)、石炭纪(东昆仑南带, 殷鸿福和张克信, 1997; 秦岭的勉略一下高川带, 张国伟等, 1996)和二叠纪(布青山—阿尼玛卿山, 西昆仑木吉—明铁盖带, 丁道桂等, 1996)的小洋盆, 属于古特提斯洋的一部分。前人在南秦岭南缘勉略地区发现了蛇绿岩带, 其内部部分超基性岩形成年龄为  $241 \pm 4.4$  Ma, 故认为这些现象指示秦岭南缘在早三叠世存在洋壳, 它们

在中一晚三叠世才消失,但在东秦岭东段和大别山南侧,仅沿青峰断裂至京山广济一线有二叠纪深水相硅质岩沉积,不清楚小洋盆是否曾经存在而后已被消减,还是根本未曾拉开成洋(殷鸿福和张克信, 1998)。尽管如此,这样一个沉积环境可能为沉积富含 Mo 元素的有机沉积物提供了有利的场所。在晚三叠世, 华南和华北板块进一步汇聚,之前存在于秦岭一大别南缘的洋盆或陆内裂陷槽中的富 Mo 沉积物,被俯冲的扬子板块夹带俯冲到华北板块之下参与成岩作用,并在早白垩世时期,伴随着大别造山带由挤压向伸展构造体系转换,进一步侵入到地壳浅部,形成大别地区大规模的花岗岩成岩作用,并伴有大规模的钼矿化作用(图 10)。

## 6 结论

(1) 西大别白垩纪含钼花岗岩与东大别花岗岩成岩作用一致,可以分为两个阶段,早阶段形成早于 132 Ma 的加厚地壳环境,晚阶段形成于 130 Ma 以后的非加厚地壳环境。

(2) 西大别白垩纪钼矿成矿作用的差异主要受控于成矿岩体形成构造环境的改变。

(3) 西大别钼矿的成矿物质来源有可能为造山带南部古秦岭洋的富钼沉积物。

**致谢:**感谢两位审稿人对本文认真的评审及提出的宝贵意见,这对文章水平的提高有着莫大的帮助;感谢编辑们在论文投稿、组织审稿过程中付出的辛勤工作和热情帮助。

## References

- Bao, Z. W., Sun, W. D., Zartman, R. E., et al., 2017. Recycling of Subducted Upper Continental Crust: Constraints on the Extensive Molybdenum Mineralization in the Qinling-Dabie Orogen. *Ore Geology Reviews*, 81: 451–465.
- Berzina, A. N., Sotnikov, V. I., Economou-Eliopoulos, M., et al., 2005. Distribution of Rhenium in Molybdenite from Porphyry Cu-Mo and Mo-Cu Deposits of Russia (Siberia) and Mongolia. *Ore Geology Reviews*, 26(1–2): 91–113.
- Bryant, D. L., Ayers, J. C., Gao, S., et al., 2004. Geochemical, Age, and Isotopic Constraints on the Location of the Sino-Korean/Yangtze Suture and Evolution of the Northern Dabie Complex, East Central China. *Geological Society of America Bulletin*, 116(5): 698–717.
- Chen, B., Jahn, B. M., Wei, C. J., 2002. Petrogenesis of Mesozoic Granitoids in the Dabie UHP Complex, Central

- China: Trace Element and Nd-Sr Isotope Evidence. *Lithos*, 60(1–2):67–88.
- Chen, W., Xu, Z.W., Lu, X.C., et al., 2013. Petrogenesis of the Bao'anzhai Granite and Associated Mo Mineralization, Western Dabie Orogen, East-Central China: Constraints from Zircon U-Pb and Molybdenite Re-Os Dating, Whole-Rock Geochemistry, and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopes. *International Geology Review*, 55(10):1220–1238.
- Chen, W., Xu, Z.W., Qiu, W.H., et al., 2015. Petrogenesis of the Yaochong Granite and Mo Deposit, Western Dabie Orogen, Eastern-Central China: Constraints from Zircon U-Pb and Molybdenite Re-Os Ages, Whole-Rock Geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 103:198–211.
- Cong, B.L., 1996. Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks in the Dabieshan-Sulu Region of China. Science Press, Beijing, 1–285 (in Chinese).
- Ding, D.G., Wang, Z.X., Liu, W.Q., et al., 1996. The Orogenic Belt and Basin of Western Kunlun. Geological Publishing House, Beijing, 1–230 (in Chinese).
- Gao, Y., Mao, J.W., Ye, H.S., et al., 2014. Geochronology, Geochemistry and Sr-Nd-Pb Isotopic Constraints on the Origin of the Qian'echong Porphyry Mo Deposit, Dabie Orogen, East China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 85:163–177.
- Guo, T. P., 2007. Geochemical Characteristics and Ore-Prospecting Criteria of the Tianmushan Molybdenum Ore District. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 31(4):309–312 (in Chinese with English abstract).
- Hacker, B.R., Ratschbacher, L.W., Webb, L., et al., 1998. U/Pb Zircon Ages Constrain the Architecture of the Ultrahigh-Pressure Qinling-Dabie Orogen, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 161(1–4):215–230.
- Huang, F., Li, S.G., Dong, F., et al., 2007. Recycling of Deeply Subducted Continental Crust in the Dabie Mountains, Central China. *Lithos*, 96(1–2):151–169.
- Li, H.C., Xu, Z.W., Lu, X.C., et al., 2012. Constraints on the Timing and Origin of the Dayinjian Intrusion and Associated Molybdenum Mineralisation at the Western Dabie Orogen, Central China. *International Geology Review*, 54(13):1579–1596.
- Li, M.L., 2009. Characteristics of Intermediate-Acid Small Intrusive Bodies and Metallogenic System of Molybdenum-Polymetallic Deposits in Mesozoic in Dabie Mountain, Henan Province (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing, 1–158 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.G., Jagoutz, E., Lo, C.H., et al., 1999. Sm/Nd, Rb/Sr, and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Isotopic Systematics of the Ultrahigh-pressure Metamorphic Rocks in the Dabie-Sulu Orogenic Belt, Central China: A Retrospective View. *International Geology Review*, 41(12):1114–1124.
- Li, Y., Li, N., Yang, Y.F., et al., 2013. Geological Features and Geodynamic Settings of the Mo Deposits in the Northern Segment of the Dabie Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1):95–106 (in Chinese with English abstract).
- Litvinovsky, B.A., Steele, I.M., Wickham, S.M., 2000. Silicic Magma Formation in Overthickened Crust: Melting of Charnockite and Leucogranite at 15, 20 and 25 kbar. *Journal of Petrology*, 41(5):717–737.
- Ma, C.Q., Li, Z.C., Ehlers, C., et al., 1998. A Post-Collisional Magmatic Plumbing System: Mesozoic Granitoid Plutons from the Dabieshan High-Pressure and Ultrahigh-Pressure Metamorphic Zone, East-Central China. *Lithos*, 45(1–4):431–456.
- Ma, C.Q., Yang, K.G., Ming, H.L., et al., 2003. The Timing of Tectonic Transition from Compression to Extension in Dabie Orogen: Evidences from Mesozoic Granites. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 33(9):817–827 (in Chinese).
- 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. *Ore Geology Reviews*, 43(1):264–293.
- Mao, J.W., Zhang, Z.C., Zhang, Z.H., et al., 1999. Re-Os Isotopic Dating of Molybdenites in the Xiaoliugou W (Mo) Deposit in the Northern Qilian Mountains and Its Geological Significance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(11–12):1815–1818.
- Meng, X.J., Xu, W.Y., Lü, Q.T., et al., 2012. Zircon U-Pb Dating of Ore-Bearing Rocks and Molybdenite Re-Os Age in Shapinggou Porphyry Molybdenum Deposit, Anhui Province. *Acta Geologica Sinica*, 86(3):486–494 (in Chinese with English abstract).
- Patino Douce, A.E., 2005. Vapor-Absent Melting of Tonalite at 15–32 kbar. *Journal of Petrology*, 46(2):275–290.
- Patino Douce, A.E., Beard, J.S., 1995. Dehydration-Melting of Biotite Gneiss and Quartz Amphibolite from 3 to 15 kbar. *Journal of Petrology*, 36(3):707–738.
- Patino Douce, A.E., Johnston, A.D., 1991. Phase Equilibria and Melt Productivity in the Pelitic System: Implications for the Origin of Peraluminous Granitoids and Aluminous Granulites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 107(2):202–218.
- Qiu, S.C., 2006a. Geological Characteristics of Dayinjian Mo-W(Cu) Deposit in Henan Province. *Express Information of Mining Industry*, (8):62–64 (in Chinese).

- Qiu, S.C., 2006b. Geological Characters and Prospecting Direction of the Mushan Molybdenum Deposit, Henan Province. *Mineral Resources and Geology*, 26(4-5): 403-408 (in Chinese with English abstract).
- Rapp, R.P., Watson, E.B., 1995. Dehydration Melting of Metabasalt at 8-32 kbar: Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891-931.
- Rudnick, R.L., Gao, S., 2003. Treatise on Geochemistry. In: Holland, H.D., Turekian, K.K., eds., Composition of the Continental Crust. Elsevier-Pergamon, Oxford, 1-64.
- Scott, C., Lyons, T.W., Bekker, A., et al., 2008. Tracing the Stepwise Oxygenation of the Proterozoic Ocean. *Nature*, 452(7186): 456-459.
- Sisson, T.W., Ratajeski, K., Hankins, W.B., et al., 2005. Voluminous Granitic Magmas from Common Basaltic Sources. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148(6): 635-661.
- Skjerlie, K.P., Johnston, A.D., 1996. Vapour-Absent Melting from 10 to 20 kbar of Crustal Rocks that Contain Multiple Hydrous Phases: Implications for Anatexis in the Deep to Very Deep Continental Crust and Active Continental Margins. *Journal of Petrology*, 37(3): 661-691.
- Stein, H.J., Markey, R.J., Morgan, J.W., et al., 2001. The Remarkable Re-Os Chronometer in Molybdenite: How and Why It Works. *Terra Nova*, 13(6): 479-486.
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implication for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313-345.
- Sun, W.D., Li, C.Y., Ling, M.X., et al., 2015. The Geochemical Behavior of Molybdenum and Mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 31(7): 1807-1817 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X.L., Shu, X.J., Xu, X.S., et al., 2012. Petrogenesis of the Early Cretaceous Adakite-Like Porphyries and Associated Basaltic Andesites in the Eastern Jiangnan Orogen, Southern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 61: 243-256.
- Wang, Y., Chen, Y.J., Ma, H.W., et al., 2009. Study on Ore Geology and Fluid Inclusion of the Tangjiaping Mo Deposit, Shangcheng County, Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 468-480 (in Chinese with English abstract).
- Wei, Q.G., Gao, X.Y., Zhao, T.P., et al., 2010. Petrogenesis of Tangjiaping Porphyry in Northern Dabie: Evidence from Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating and Geochemical. *Acta Petrologia Sinica*, 26(5): 1550-1562 (in Chinese with English abstract).
- English abstract).
- Wu, F.Y., Lin, J.Q., Wilde, S.A., et al., 2005. Nature and Significance of the Early Cretaceous Giant Igneous Event in Eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1-2): 103-119.
- Wu, F.Y., Xu, Y.G., Gao, S., et al., 2008. Lithospheric Thinning and Destruction of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1145-1174 (in Chinese with English abstract).
- Xie, Z., Zheng, Y.F., Zhao, Z.F., et al., 2006. Mineral Isotope Evidence for the Contemporaneous Process of Mesozoic Granite Emplacement and Gneiss Metamorphism in the Dabie Orogen. *Chemical Geology*, 231: 214-235.
- Xu, H.J., Ma, C.Q., Ye, K., et al., 2007. Early Cretaceous Granitoids and Their Implications for the Collapse of the Dabie Orogen, Eastern China: SHRIMP Zircon U-Pb Dating and Geochemistry. *Chemical Geology*, 240(3-4): 238-259.
- Xu, H.J., Ma, C.Q., Zhang, J.F., et al., 2013. Early Cretaceous Low-Mg Adakitic Granites from the Dabie Orogen, Eastern China: Petrogenesis and Implications for Destruction of the Over-Thickened Lower Continental Crust. *Gondwana Research*, 23: 190-207.
- Xu, X.C., Lou, J.W., Lu, S.M., et al., 2009. Re-Os Ages of Molybdenum-Lead-Zinc Polymetallic Deposits and  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  Ages of Related Magmatic Rocks in Yinshan Area, Jinzhai, Anhui Province. *Mineral Deposits*, 28(5): 621-632 (in Chinese with English abstract).
- Xue, F., Rowley, D.B., Tucker, R.D., et al., 1997. U-Pb Zircon Ages of Granitoid Rocks in the North Dabie Complex, Eastern Dabie Shan, China. *Journal of Geology*, 105(6): 744-753.
- Xue, H.M., Dong, S.W., Liu, X.C., 2002. U/Pb Zircon Dating for Cretaceous Adakitic Volcanic Rocks in Eastern Part of the North Dabie Mountains. *Geochimica*, 31(5): 455-463 (in Chinese with English abstract).
- Yang, M.Z., Zeng, J.N., Li, F.L., et al., 2011. Geochemistry of Mineralization and Granitic Magmatism of Dayinjian Mo Deposit, Xinxiang County, Henan Province and Its Geological Significance. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(3): 279-292 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z.Q., 2007a. Re-Os Isotopic Ages of Tangjiaping Molybdenum Deposit in Shangcheng County, Henan Province and Their Geological Significance. *Mineral Deposits*, 26(3): 289-295 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z.Q., 2007b. Wallrock Alteration and Mineralization in the Tangjiaping Mo Deposit of Shangcheng County, Henan Province. *Geology and Prospecting*, 43(5): 17-

- 22 (in Chinese with English abstract).
- Yin, H.F., Zhang, K.X., 1997. Characteristics of the Eastern Kunlun Orogenic Belt. *Earth Science*, 22(4): 339—342 (in Chinese with English abstract).
- Yin, H.F., Zhang, K.X., 1998. Evolution and Characteristics of the Central Orogenic Belt. *Earth Science*, 23(5): 438—442 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.W., Meng, Q.R., Yu, Z.P., et al., 1996. Orogenic Process and Dynamic Characteristics of the Qinling Orogenic Belt. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 26(3): 193—200 (in Chinese).
- Zhang, H.F., Zhong, Z.Q., Gao, S., et al., 2004. Pb and Nd Isotopic Composition of the Jigongshan Granite, Constraints on Crustal Structure of Tongbaishan in the Middle Part of the Qinling-Tongbai-Dabie Orogenic Belt, Central China. *Lithos*, 73(3—4): 215—227.
- Zhang, S.M., Jiang, G.L., Liu, K.F., et al., 2014. Evolution of the Neoproterozoic-Mesozoic Sedimentary Basins in Qinling-Dabie Orogenic Belt. *Earth Science*, 39(8): 1185—1199 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2014.103>
- Zhao, Z.F., Zheng, Y.F., 2009. Remelting of Subducted Continental Lithosphere, Petrogenesis of Mesozoic Magmatic Rocks in the Dabie-Sulu Orogenic Belt. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 39(7): 888—909 (in Chinese).
- Zhao, Z.F., Zheng, Y.F., Wei, C.S., et al., 2004. Zircon Isotope Evidence for Recycling of Subducted Continental Crust in Post Collisional Granitoids from the Dabie Terrane in China. *Geophysical Research Letters*, 31(22): 1029—1033.
- Zhao, Z.F., Zheng, Y.F., Wei, C.S., et al., 2005. Zircon U-Pb Age, Element and C-O Isotope Geochemistry of Post-Collisional Mafic-Ultramafic Rocks from the Dabie Orogen in East-Central China. *Lithos*, 83(1—2): 1—28.
- Zhao, Z.F., Zheng, Y.F., Wei, C.S., et al., 2007. Post-Collisional Granitoids from the Dabie Orogen in China: Zircon U-Pb Age, Element and O Isotope Evidence for Recycling of Subducted Continental Crust. *Lithos*, 93(3—4): 248—272.
- Zhao, Z.F., Zheng, Y.F., Wei, C.S., et al., 2008. Zircon U-Pb Ages, Hf and O Isotopes Constrain the Crustal Architecture of the Ultrahigh-Pressure Dabie Orogen in China. *Chemical Geology*, 253(3—4): 222—242.
- Zheng, Y.F., 2008. A Perspective View on Ultrahigh-Pressure Metamorphism and Continental Collision in the Dabie-Sulu Orogenic Belt. *Chinese Science Bulletin*, 53(18): 2129—2152 (in Chinese).
- Zheng, Y.F., Wu, Y.B., Chen, F.K., et al., 2004. Zircon U-Pb and Oxygen Isotope Evidence for a Large-Scale  $^{18}\text{O}$  Depletion Event in Igneous Rocks during the Neoproterozoic. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(20): 4145—4165.
- Zheng, Y.F., Zhao, Z.F., Li, S.G., et al., 2003. Oxygen Isotope Equilibrium between Ultrahigh-Pressure Metamorphic Minerals and Its Constraints on Sm-Nd and Rb-Sr Chronometers. *Geological Society, London, Special Publications*, 220(1): 93—117.
- Zheng, Y.F., Zhao, Z.F., Wu, Y.B., et al., 2006. Zircon U-Pb Age, Hf and O Isotope Constraints on Protolith Origin of Ultrahigh-Pressure Eclogite and Gneiss in the Dabie Orogen. *Chemical Geology*, 231(1—2): 135—158.
- ### 附中文参考文献
- 从柏林,1996.中国大别山—苏鲁地区超高压变质岩.北京:科学出版社,1—285.
- 丁道桂,王遭轩,刘伟群,等,1996.西昆仑造山带与盆地.北京:地质出版社,1—230.
- 郭铁朋,2007.天目山钼矿区地球化学特征及找矿标志.物探与化探,31(4): 309—312.
- 李明立,2009.河南省大别山地区中生代中酸性小岩体特征及钼多金属成矿系统(博士学位论文).北京:中国地质大学,1—158.
- 李毅,李诺,杨永飞,等,2013.大别山北麓钼矿床地质特征和地球动力学背景.岩石学报,29(1): 95—106.
- 马昌前,杨坤光,明厚利,等,2003.大别山中生代地壳从挤压转向伸展的时间:花岗岩的证据.中国科学(D辑:地球科学),33(9): 817—827.
- 孟祥金,徐文艺,吕庆田,等,2012.安徽沙坪沟斑岩钼矿锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄. 地质学报, 86(3): 486—494.
- 邱顺才,2006a.河南大银尖钼钨(铜)矿床地质特征.矿业快报,(8): 62—64.
- 邱顺才,2006b.河南省母山钼矿地质特征及找矿方向.矿产与地质,20(4—5): 403—408.
- 孙卫东,李聪颖,凌明星,等,2015.钼的地球化学性质与成矿.岩石学报,31(7): 1807—1817.
- 王运,陈衍景,马宏卫,等,2009.河南省商城县汤家坪钼矿床地质和流体包裹体研究.岩石学报,25(2): 468—480.
- 魏庆国,高昕宇,赵太平,等,2010.大别山北麓汤家坪花岗斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年和岩石地球化学特征及其对岩石成因的制约.岩石学报,26(5): 1550—1562.
- 吴福元,徐义刚,高山,等,2008.华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论.岩石学报,24(6): 1145—1174.
- 徐晓春,楼金伟,陆三明,等,2009.安徽金寨银山钼—铅—锌多金属矿床 Re-Os 和有关岩浆岩  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄测定. 矿床地质, 28(5): 621—632.
- 薛怀民,董树文,刘晓春,2002.北大别东部白垩纪埃达克质火山岩及其锆石 U-Pb 年代学.地球化学, 31(5):

455—463.

杨梅珍,曾键年,李法岭,等,2011.河南新县大银尖钼矿床成岩成矿作用地球化学及地质意义.地球学报,32(3):279—292.

杨泽强,2007a.河南商城县汤家坪钼矿辉钼矿铼—锇同位素年龄及地质意义.矿床地质,26(3):289—295.

杨泽强,2007b.河南省商城县汤家坪钼矿围岩蚀变与成矿.地质与勘探,43(5):17—22.

殷鸿福,张克信,1997.东昆仑造山带的一些特点.地球科学,22(4):339—342.

殷鸿福,张克信,1998.中央造山带的演化及其特点.地球科

学,23(5):438—442.

张国伟,孟庆任,于在平,等,1996.秦岭造山带的造山过程及其动力学特征.中国科学(D辑:地球科学),26(3):193—200.

张思敏,姜高磊,柳坤峰,等,2014.秦岭一大别新元古代—中生代沉积盆地演化.地球科学,39(8):1185—1199.

赵子福,郑永飞,2009.俯冲大陆岩石圈重熔:大别—苏鲁造山带中生代岩浆岩成因.中国科学(D辑:地球科学),39(7):888—909.

郑永飞,2008.超高压变质与大陆碰撞研究进展:以大别—苏鲁造山带为例.科学通报,53(18):2129—2152.

\* \* \* \* \*

## 两期刊入选“中国最具国际影响力学术期刊”

近日,在中国学术期刊国际、国内引证报告发布会上获悉,我校主办的《地球科学》、《Journal of Earth Science》双双再次入选“2018 中国最具国际影响力学术期刊”,两刊排名与去年相比均有提升.

据《中国学术期刊国际引证年报》(2018 版)统计数据,将中国期刊分为人文社科、自然科学与工程技术两个类别,分别计算期刊影响力指数,按排序遴选了 TOP5% 以内的期刊为“最具国际影响力学术期刊”、TOP5%~10% 之间的期刊为“最具国际影响力优秀学术期刊”.

评选国际影响力品牌学术期刊的目的是树立国内期刊品牌,促进期刊国际化发展,引导学者优先投稿,共同建设一批面向国际学术界具有代表性、开放性的优秀期刊.《地球科学》、《Journal of Earth Science》已连续多年获此殊荣.