

# 太行—燕辽地区燕山期造山过程、岩浆源区与成矿作用

邓晋福<sup>1,2</sup> 冯艳芳<sup>1,2</sup> 刘 翠<sup>2</sup> 肖庆辉<sup>1</sup> 苏尚国<sup>2</sup> 周 肃<sup>2</sup> 高延光<sup>3</sup>

(1. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 3. 中国地质调查局, 北京 100037)

**摘要:**太行—燕辽造山带是中国东部一个重要的燕山期(J-K)Au-Mo-Pb-Zn-Ag-Cu-Fe 金属成矿带和重要煤田分布区。本文首先讨论了该区 18 个金属矿床以及相关侵入岩的同位素年龄数据, 选取了其中 10 个比较可信的数据作为成矿作用的近似年龄, 以及运用 4 个煤田的已有的相关地层的时代, 在已有的岩浆-构造事件序列的框架基础上, 扩展提出该区岩浆-沉积-构造-变质-成矿事件序列的初步框架。进而, 讨论造山过程, 岩浆源区与成矿作用的可能成生联系。前造山幕—初始造山幕(J<sub>1</sub>)和后造山幕(K<sub>1</sub>)比较宁静的构造和湿热环境为煤田形成提供了良好的动力学环境。同造山幕的大量岩浆活动为金属矿床形成提供重要背景。早期造山幕(J<sub>2</sub>)伴随古老下地壳的熔融, 生成以安山质为主的岩浆活动和伴生以 Au 为主成矿作用。峰期造山幕(J<sub>3</sub>), 陆壳升温达峰值, 导致上地壳岩石大规模熔融作用, 形成大规模花岗质岩浆侵入, 伴生以 Mo 为主的成矿作用。晚期造山幕(K<sub>1</sub>), “过热的”上部地壳开始降温, 壳幔深部的镁铁质岩浆更多地喷出和侵入, 伴生以 Fe 矿床的形成, 同时, 新形成的侏罗纪下地壳熔融, 伴生 Cu 矿。

**关键词:**燕山期; 太行—燕辽造山带; 岩浆-沉积-构造-变质-成矿事件序列

**中图分类号:** P542<sup>+</sup>.1; P611.1<sup>+</sup>1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3657(2009)03-0623-11

## 1 前 言

1927 年翁文灏先生提出“燕山运动”术语<sup>[1]</sup>, 用以描述和概括燕辽地区侏罗纪—白垩纪时期的造山作用, 至今已有 80 余年。众所周知, 太行—燕辽地区从新太古代—古元古代形成大陆地壳和岩石圈以后直至侏罗纪前一直处于构造上十分稳定的克拉通环境, 但是, 侏罗纪以来突发强烈的岩浆活动, 挤压构造变形和成矿作用, 失去了构造上的稳定性, 而转变为构造上活跃的造山带。这种突发性的构造性质的转换, 在全球克拉通地区是很少见的。因而, 该区以至整个中国东部的“燕山运动”的各种表现和地质纪录, 以及发生的动力学背景

始终是一个重大的科学难题, 一直引起广大地质工作者的关注和讨论。据不完全统计<sup>[2]</sup>, 中国已发现的 33 个超大型内生金属矿中, 有 17 个分布于中国东部, 形成于燕山期, 可见“燕山运动”之重要意义。

那么, “燕山运动”3 个重要地质现象, 即岩浆活动、构造变形与成矿作用之间有怎样的成生联系? 燕辽地区是提出“燕山运动”的发源地, 因此, 通过太行—燕辽地区, 研究侏罗纪—白垩纪岩浆活动, 构造变形与成矿作用之间的成生联系及其动力学背景, 有十分重要的意义。笔者曾对此主题进行过十分粗略的讨论<sup>[3]</sup>, 本文将对此主题作进一步的讨论。

收稿日期: 2009-01-03; 改回日期: 2009-02-28

基金项目: 全国重要矿产成矿地质背景研究(1212010633902), 全国重要矿产和区域成矿规律研究中长江中下游成矿规律研究专题(1212010633903), 中国东部中生代大陆岩石圈刚变过程、动力学机制与矿产资源响应项目(1212010711814)和中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室项目(GPMR0735)资助。

作者简介: 邓晋福, 男, 1935 年生, 教授, 从事火成岩研究; E-mail: dengjinfu@21cn.com。

## 2 Au-Mo-Pb-Zn-Ag-Cu-Fe 与煤成矿带

### 2.1 Au-Mo-Pb-Zn-Ag-Cu-Fe 矿床与煤田的空间分布

太行—燕辽造山带是中国东部燕山期 (J-K) 一个重要的 Au-Mo-Pb-Zn-Ag-Cu-Fe 金属成矿带,亦是煤田分布的重要地带。图 1 概略地展示了 18 个有代表性的金属矿床和 4 个重要煤田的分布<sup>[9]</sup>,图中的编号为矿床编号,请见表 1。

### 2.2 有关矿床形成时代的讨论

煤田形成的时代比较容易确定,因为煤系地层中化石较多,可供比较精确地鉴定。但是,金属矿床及其有关的侵入体的年龄的确定比较困难,特别是金属矿床的年龄确定更为困难。金属矿床与相关侵入体的年龄的确定十分重要,它可为成矿作用与岩浆作用的成生联系提供年代学依据,以便更好地讨论成矿作用的可能源区,成矿作用的阶段性与岩浆作用的阶段性,以及成矿作用与造山幕之间的成生联系。笔者<sup>[9]</sup>曾进行过尝试性的讨论,因为,现今有

关成矿作用的年龄确定仍是十分困难的。表 1 中带“※”者为本文所选取的认为比较可靠的矿床和煤田的年龄,即 No.1, No.4, No.6, No.7, No.8, No.10, No.12, No.13, No.14, No.18, No.19, No.20, No.21, No.22, 下面对金属矿床的年龄进行简略的讨论。

近年来,毛景文等<sup>[8,14]</sup>对华北地区典型矿床的同位素年龄与成矿有关的花岗质岩石的同位素年龄数据进行了评述,提出了三大成矿期分别为 200~160 Ma, 140 Ma 左右和 130~110 Ma, 它们分别对应碰撞造山过程, 构造体制大转折和岩石圈大规模拆沉作用, 其中包括表 1 中列出的 10 个矿床, 蔡家营 Pb、Zn、Ag 矿 (No.6)、大庄科 Mo 矿 (No.7)、小寺沟 Cu 矿 (No.11), 寿王坟 Cu 矿 (No.10), 排山楼 Au 矿 (No.18), 杨家仗子 Mo 矿 (No.16), 兰家沟 Mo 矿 (No.17), 金厂峪 Au 矿 (No.14), 峪耳崖 Au 矿 (No.12), 牛心山 Au 矿 (No.13), 这在成矿作用年代学研究方面是一个重要进展。关于成矿期的划分, 及其与造山阶段与过程的对应关系, 笔者将在后面讨论。这里主要讨论成矿作用可能年龄的合理选取问题。

(1)关于寿王坟矽卡岩型 Cu 矿的年龄:毛景文

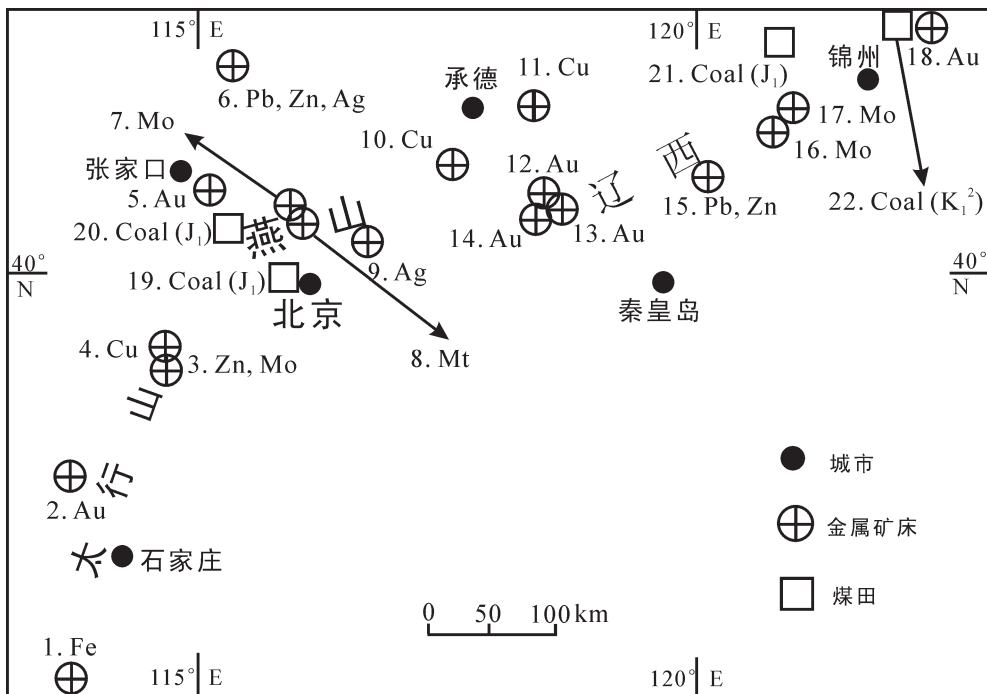


图 1 太行—燕山—辽西造山带燕山期 (J-K) 代表性矿床分布略图<sup>[9]</sup>  
(金属矿床的类型和同位素年龄见表 1)

Fig.1 Simplified map showing representative Yanshanian (Jurassic-Cretaceous) ore deposits in the Taihangshan-Yanshan-west Liaoning orogenic belt<sup>[9]</sup>

表 1 太行—燕山—辽西造山带与燕山期成矿有关的侵入体和矿床同位素年龄以及煤田形成时代  
(据邓晋福等<sup>[3]</sup>补充修改)

Table 1 Isotopic ages of Yanshanian (Jurassic–Cretaceous) ore-related intrusive rocks and ore deposits and coal-formation epochs in the Taihangshan–Yanshan–west Liaoning orogenic belt (after Deng et al<sup>[3]</sup>)

矿床			有关的侵入体年龄/Ma	成矿作用年龄/Ma	文献来源
编号	名称	类型			
※NO.1	武安 Fe	矽卡岩	Q $\eta$ :133~127 (U-Pb,2) v: 138 (U-Pb, 1)		文献[4]
NO.2	麻棚 Au	脉金	$\gamma$ : 135 (Rb-Sr)		文献[5]
NO.3	大湾 Zn Mo	矽卡岩和斑岩	$\gamma\pi$ : 142 (Rb-Sr)		文献[5]
※NO.4	涞源 Cu	矽卡岩和斑岩	Q $\eta$ : 136(U-Pb,1)		文献[6]
NO.5	小营盘 Au	脉金		170	文献[7]
※NO.6	蔡家营 Pb Zn Ag	热液	Q $\pi$ : 119 (U-Pb, 2)	119	文献[7-8]
※NO.7	大庄科 Mo	爆破角砾岩	$\gamma$ : 138~136 (U-Pb, 1)	145, 147	文献 [9]
※NO.8	上庄 Mt (磁铁矿)	层状侵入体	v : 129 (U-Pb,1)		文献[9]
NO.9	银冶岭 Ag	热液			文献[10]
※NO.10	寿王坟 Cu	矽卡岩	Q $\eta$ :130 (U-Pb, 2)	148	文献[6]
NO.11	小寺沟 Cu	矽卡岩	Q $\eta$ : 129 (K-Ar)	134	文献[11]
※NO.12	峪耳崖 Au	脉金	$\gamma$ : 174~175 (U-Pb, 1)	177, 177(Rb-Sr,绢云母)	文献[7, 12]
※NO.13	牛心山 Au	脉金	$\gamma$ : 172 (U-Pb, 1)	175.8( <sup>40</sup> Ar - <sup>39</sup> Ar,石英)	文献[12, 14]
※NO.14	金厂峪 Au	脉金	$\gamma$ : 199 (U-Pb, 1)	197,170~155(K-Ar,绢云母)	文献[7-8]
NO.15	八家子 Pb Zn	矽卡岩	$\eta$ : 170 (Rb-Sr)		文献[13]
NO.16	杨家仗子 Mo	矽卡岩		(191~185)	文献[10]
NO.17	兰家沟 Mo	斑岩	$\gamma$ : 154 (Rb-Sr) 148~145 (K-Ar)	(191~185)	文献[13]
※NO.18	排山楼 Au	剪切带	$\gamma$ : 126~124 (U-Pb, 1)	124( <sup>40</sup> Ar - <sup>39</sup> Ar, 黑云母)	文献[8]
※NO.19	门头沟煤田			J <sub>1</sub>	文献[15-16]
※NO.20	下花园煤田			J <sub>1</sub>	文献[15]
※NO.21	北票煤田			J <sub>1</sub>	文献[17]
※NO.22	阜新煤田			K <sub>1</sub>	文献[17]

注:矿床编号见图 1; v -辉长岩,  $\eta$  - 二长岩; Q $\eta$  -石英二长岩;  $\gamma$  -花岗岩; Q $\pi$  -石英斑岩; U-Pb,1 为 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄; U-Pb,2 为单颗粒锆石 U-Pb 年龄; Rb-Sr 等时年龄; K-Ar 表面年龄; 成矿作用年龄一栏括号内数字为辉钼矿 Re-Os 模式年龄(毛景文等, 2003<sup>[8]</sup>), 见正文讨论; ※为本文所取的矿床和煤田的年龄。

等<sup>[8,14]</sup>根据辉钼矿的 Re-Os 模式年龄认为,矿床形成于 148 Ma(表 1 中 No.10,用括号表示 Re-Os 年龄),但是,与 Cu 矿有关的侵入体的 Q $\eta$  的颗粒锆石 U-Pb 年龄则为 130 Ma(Davis et al<sup>[6]</sup>,2001),两者是矛盾的,如何选取更为合理?

①从同位素定年测试的方法学来看, 锆石 U-Pb 定年比 Re-Os 模式年龄更为可靠。

②从矽卡岩型矿床来说,成矿作用应比与之有成生联系的相关的花岗岩类略为年轻些,从目前的测试精度来看,有可能在误差范围内为准同时的。因此,把相关的花岗岩类比较可靠的同位素定年数

据看作成矿作用时间的下限是合理的。

③寿王坟 Cu 矿所在的寿王坟盆地内的黄土梁安山岩的角闪石的 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 定年为(147.6±1.6)Ma<sup>[6]</sup>。寿王坟 Cu 矿不是火山岩型的,而是与花岗岩类侵入岩有关的矿床,从地质穿切关系来说,与寿王坟有关的侵入岩类(130 Ma)是侵入在火山岩及其基底的中元古蓟县系雾迷山组地层内的<sup>[15]</sup>,因此,Cu 矿应晚于火山岩的年龄(147.6 Ma)。

④从地质事件序列来看<sup>[6,9,18]</sup>,寿王坟火山盆地内火山喷发(147.6 Ma)之后,在其北侧发育古北口逆冲推覆构造把火山岩深埋,寿王坟侵入杂岩体

(130 Ma)和邻近的雾灵山过碱性石英正长岩-石英正长岩杂岩体(128.8±1.5 Ma, 131.7±1.5 Ma)<sup>[6]</sup>穿切古北口逆冲推覆构造和侵入火山岩中<sup>[5]</sup>,表明逆冲构造发生的时间为147.6~130 Ma。从与逆冲构造发育同时伴生的磨拉石建造直接覆盖在火山岩上面来看,逆冲构造发育的时间更接近于147.6 Ma,而离130 Ma稍远些。火山岩与比它晚的侵入杂岩现今同处于同一个地形高度上,表明:①火山岩确被深埋过,因为侵入岩是在地表下面一定深度处形成的;②~130 Ma的侵入杂岩年龄,以及它们属于中等深度侵入体来看,可能位于7~8 km深度,由此可以推测,130 Ma时火山岩深埋于7~8 km深度处。亦就是说,从地质事件序列来看,火山岩(147.6 Ma)→逆冲构造变形(147.6 Ma之后,~130 Ma之前)→侵入杂岩(~130 Ma)的发育,它们的同位素年龄数据是比较合理的,即地质事件序列与火成岩同位素年龄之间有好的相互约束和反馈关系,因而是可信的。

由上,笔者暂取130 Ma花岗岩类年龄作为寿王坟Cu矿的近似年龄,而没有取Re-Os模式年龄(148 Ma)作为成矿年龄。

(2)关于大庄科Mo矿的年龄:毛景文等<sup>[8,14]</sup>根据辉钼矿的Re-Os模式年龄认为,矿床形成于~145 Ma(147±7 Ma, 145±11 Ma, 146±6 Ma)(表1中No.7用括号表示Re-Os年龄),但是与Mo矿相关的八达岭花岗岩类杂岩体(或岩基)的SHRIMP锆石U-Pb年龄为136~138 Ma<sup>[3,9]</sup>,两者的矛盾,应如何选取?

①大庄科Mo矿为爆破角砾岩型,因而,相关的花岗岩类的比较可靠的同位素年龄可看作Mo矿形成的近似年龄或下限年龄。

②关于大庄科花岗岩的同位素年龄:大庄科花岗岩无同位素年龄数据,北京市区域地质志<sup>[10]</sup>提出,把它归属燕山晚期(137~80 Ma)第一次侵入,与碓臼峪花岗岩(129.4 Ma, 128.8 Ma, 黑云母K-Ar年龄)属同期同次产物,而晚于邻近的汉家川石英二长岩(147.2 Ma, 150.2 Ma, 黑云母K-Ar定年; 163.9 Ma, Rb-Sr定年),为燕山中期(160~137 Ma)第一次侵入。白志民等<sup>[11]</sup>把无同位素年龄数据的大庄科花岗岩归属碓臼峪超单元中扬麻地单元(扬麻地单元同位素年龄133 Ma),该超单元中另一个单元为碓臼峪单元(碓臼峪单元同位素年龄128 Ma),归属晚侏罗世。汉家川石英二长岩,碓臼峪花岗岩,八达岭花岗岩和大庄科花岗

岩同属八达岭花岗岩岩基的单个侵入体,笔者对该岩基中3个独立侵入体进行了SHRIMP锆石U-Pb定年,汉家川石英二长岩(WY-60)137.6±1.2 Ma,碓臼峪花岗岩(WY-61)137.7±3.6 Ma,八达岭花岗岩(WM03-26)136 Ma<sup>[9,13]</sup>,它们属于同期花岗岩类侵入体,归属晚侏罗世晚期产物,而不是北京市区域地质志<sup>[10]</sup>和白志民等<sup>[11]</sup>认为的,它们分属于晚侏罗世和早白垩世。SHRIMP锆石U-Pb定年技术显然优于黑云母K-Ar定年和全岩Rb-Sr定年技术。大庄科花岗岩属于八达岭岩基的一个独立侵入体,现今暂无SHRIMP定年,笔者暂将已有的上述3个侵入体的年龄136~138 Ma作为大庄科花岗岩的参考年龄。

由上,笔者暂取136~138 Ma作为大庄科Mo矿的参考年龄。

### (3)峪耳崖脉Au矿和牛心山脉Au矿的年龄

毛景文等<sup>[8,14]</sup>根据峪耳崖花岗岩和牛心山花岗岩的SHRIMP锆石U-Pb定年<sup>[12]</sup>认为,脉Au矿形成大体同时(分别为174 Ma, 175 Ma和172 Ma)。峪耳崖脉Au矿的矿石Pb模式年龄与蚀变岩绢云母的Rb-Sr年龄均为177 Ma<sup>[7]</sup>,牛心山Au矿石英<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar年龄为175.8 Ma<sup>[14]</sup>,它们与花岗岩的年龄大体吻合。这样,2个脉金矿床类型相似,花岗岩特征相似,又处于邻近的同一地质空间,可以认为它们的成岩-成矿年龄近似选取175~172 Ma作为成矿年龄是比较合理的。

### (4)金厂峪脉Au矿的年龄

毛景文等<sup>[8,14]</sup>根据青山口花岗岩的SHRIMP锆石U-Pb年龄,把成矿年龄限定为199 Ma。Au矿矿石Pb模式年龄197 Ma,蚀变矿物绢云母K-Ar年龄170~155 Ma<sup>[7]</sup>,如果与青石口花岗岩年龄比较,矿石Pb模式年龄比较合理,K-Ar年龄则显得太小些。这样,选取199 Ma作为Au矿的近似年龄是比较合理的。

### (5)排山楼剪切带类型的Au矿年龄

毛景文等<sup>[8,14]</sup>根据Au矿黑云母<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar年龄(124 Ma)和邻近花岗岩岩类SHRIMP锆石U-Pb年龄(126~124 Ma)的一致性,认定成矿年龄为124 Ma是合理的。

### (6)蔡家营Pb、Zn、Ag矿热液型矿床的年龄

毛景文等<sup>[8,14]</sup>根据相关的石英斑岩的颗粒锆石U-Pb年龄,认为成矿年龄为119 Ma。该矿床的矿石Pb模式年龄119 Ma<sup>[7]</sup>与石英斑岩年龄符合,支持

毛景文等<sup>[8,14]</sup>的认识。

#### (7) 上庄镁铁质层状侵入体磁铁矿矿床年龄

邓晋福等<sup>[3]</sup>把辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄  $128.8 \pm 1.7 \text{ Ma}$ <sup>[9]</sup>看作磁铁矿矿床形成的年龄,它的合理性在于矿床类型是岩浆型的,它是由岩浆结晶分离作用的机理形成的矿床,应与寄主岩浆岩同时代形成。

#### (8) 武安铁矿和涞源 Cu 矿年龄

武安铁矿为矽卡岩型,涞源 Cu 矿为矽卡岩型和斑岩型,因此,把近年来获得的比较可靠的相关侵入岩的锆石 U-Pb 年龄作为近似的成矿年龄,即它们分别为 133~127 Ma 和 136 Ma,是比较合理的<sup>[3]</sup>,虽然,它们暂无矿床年龄的直接数据<sup>[3]</sup>。

(9) 其他矿床,由于缺乏比较可靠的同位素定年数据,暂不选取。它们是,麻棚脉 Au 矿(表 1, No.2),大湾 Zn、Mo 矿(表 1, No.3),小营盘脉 Au 矿(表 1, No.5),银冶岭热液型 Ag 矿(表 1, No.9),小寺沟 Cu 矿(表 1, No.11),八家子矽卡岩型 Pb、Zn 矿(表 1, No.15),杨家仗子矽卡岩型 Mo 矿(表 1, No.16)和兰家沟斑岩 Mo 矿(表 1, No.17)。

### 2.3 小结

综上,太行—燕辽地区的 Au—Mo—Pb—Zn—Ag—Cu—Fe 金属成矿带与岩浆活动在时间上的一致性,重要煤田的形成与同时代的相应的特征沉积建造相伴生,均从年代学的约束,提供了成矿作用与岩浆活动和沉积作用之间的成因联系。

## 3 造山过程与成矿作用

### 3.1 岩浆—沉积—构造—变质—成矿事件序列

表 2 为华北太行—燕山—辽西地区燕山期造山带的岩浆—沉积—构造—变质—成矿事件序列的初步框架,它是在已有的华北燕山造山带岩浆—构造—成矿事件序列初步框架<sup>[18,3]</sup>基础上补充修改而成的,主要补充修改的是矿床和造山幕二栏,以期把金属成矿事件与火成岩事件,煤田形成事件与沉积事件对应起来,以及把这些事件形成的时间序列纳入造山幕的划分框架中,来初步讨论成矿事件在造山过程中的位置及其演化趋势,并从地质事件序列这个视角初步讨论岩浆—沉积—构造作用与成矿作用的成生联系。应当指出,这是一项十分艰难的但又十分重要的研究课题,本文属于尝试性的讨论,许多问题还有待于进一步的研究。

表 2 的年代学划分方案按 Remane et al<sup>[22]</sup>公布的国际地层表划分方案。表 2 列出的事件序列包括地层火山岩组合、沉积建造、侵入岩组合、构造变形相或要素、变质作用与矿床形成,以及构造不整合事件等。

对于矿床形成时代的归属问题,已在上一节做了初步讨论(图 1 和表 1)。对于煤田形成的归属已有共识,因为它们分属于相应的地层组,已有大量的古生物地层研究成果<sup>[15-17]</sup>。对于金属矿床形成的时代有一些比较清晰,有一些仍不能最终确定,需要进一步研究,因此,在表 2 中列出的金属矿床形成时代的归属只能看作一个框架,有待进一步验证和修改。金厂峪 Au 矿归入  $J_1$ (图 1, 表 1, No.14),峪耳崖 Au 矿归入  $J_2$ (图 1, 表 1, No.12),牛心山 Au 矿归入  $J_2$ (图 1, 表 1, No.13),上庄 Fe 矿归入  $K_1^1$ (图 1, 表 1, No.8),蔡家营 Pb、Zn、Ag 矿归入  $K_1^2$ (图 1, 表 1, No.6)可靠性较好。排山楼剪切带 Au 矿(图 1, 表 1, No.18)年龄可靠性好,按年龄正好处于晚造山幕和后造山幕分界处,但按其可能与锦州变质核杂岩有关<sup>[23]</sup>暂把它置于后造山幕的  $K_1^2$ 位置。涞源 Cu 矿归入  $J_3$ (图 1, 表 1, No.4),武安 Fe 矿归入  $K_1^1$ (表 1, No.1),寿王坟 Cu 矿归入  $K_1^1$ (表 1, No.10),和大庄科 Mo 矿归入  $J_3$ (图 1, 表 1, No.7)均有侵入岩的较可靠的锆石 U-Pb 年龄,以及考虑到它们的矿床类型属于矽卡岩型、斑岩型和爆破角砾岩筒型,因此侵入岩的年龄可看作比较可靠的成矿作用下限年龄。小营盘 Au 矿(图 1, 表 1, No.5),麻棚 Au 矿(图 1, 表 1, No.2),大湾 Zn—Mo 矿(图 1, 表 1, No.3)小寺沟 Cu 矿(图 1, 表 1, No.11),八家子 PbZn 矿(图 1, 表 1, No.15),杨家仗子 Mo 矿(图 1, 表 1, No.16)和兰家沟 Mo 矿(图 1, 表 1, No.17),只有有关侵入体的 Rb—Sr 和 K—Ar 年龄,以及银冶岭 Ag 矿(图 1, 表 1, No.9),均无可靠的同位素年龄数据,暂不选取放入表 2 中。

### 3.2 造山幕与成矿作用

根据不整合面大致可识别出 5 个造山幕:(1)前造山幕和初始造山幕( $J_1$ );(2)早(期)造山幕( $J_2$ );(3)峰(期)造山幕( $J_3$ );(4)晚期造山幕( $K_1^1$ ,早白垩纪早期);(5)后造山幕( $K_1^2$ ,早白垩纪晚期)(表 2)。

表 2 中每一个造山幕,除了最后的后造山幕之外,均符合于地质事件的一个短的小旋回,即从火山喷发和侵入体作用开始,经过沉积作用,到构造变形

表 2 华北太行-燕山-辽西地区燕山期造山带的岩浆-沉积-构造-变质-成矿事件序列的初步框架  
(据邓晋福等, 2006<sup>[18]</sup>, 邓晋福等, 2007<sup>[3]</sup>, 补充修改)

Table 2 A preliminary scheme for the Yanshanian (Jurassic-Cretaceous) magmatic-sedimentary-tectonic-metamorphic-metallogenetic event sequence of the Taihangshan-Yanshan-west Liaoning orogenic belt, North China (modified after Deng et al., 2006<sup>[18]</sup>; Deng et al., 2007<sup>[3]</sup>)

年代	火山与沉积建造	侵入岩组合	构造变形与变质作用	主要矿床和实例 (图 1 的 No.)	造山幕
96Ma	K <sub>2</sub> 类磨拉石 (?)				
	K <sub>1</sub> <sup>2</sup> 含煤建造 湖相建造	A/γ-γ 组合 (118~119 Ma), 双峰 岩墙群(120~114Ma)	早白垩世晚期 (K <sub>1</sub> <sup>2</sup> ) 变质核杂岩 (119~114 Ma) 和正断层	煤田 (No. 22), Pb Zn、Ag、Au (No. 6、No. 18)	后造山
	K <sub>1</sub> <sup>1</sup> B-TB-BTA 组合, (135~121Ma)	v-η v-η δ-η-ε -A/ε-γ 组合 (133~127Ma)	早白垩世早期 (K <sub>1</sub> <sup>1</sup> ) 局部发育NW 走向逆冲断层~130Ma	Fe, Cu (No. 1, No.8, No.10)	晚造山
135Ma			J <sub>3</sub> 晚期 NE 走向逆冲断层 (138~136 Ma)		
	J <sub>3</sub> 磨拉石 TA-T-D-R 组合, (148~140Ma)	v-η δ-η-Q η-γ 组合(148~136Ma)	J <sub>3</sub> 早期向南的逆冲(144~140Ma) (四合堂、古北口) 与角闪岩相 变质作用 (144~138Ma)	Mo, Cu (No.7, No.4, )	峰(期) 造山
154Ma			J <sub>2</sub> 晚期—J <sub>3</sub> 初期向北的逆冲 (161~148Ma) (承德、十三陵、兴 隆) 与角闪岩相变质作用 (159~151Ma)	Au, (No. 12, No.13)	早(期) 造山
	J <sub>2</sub> 磨拉石 TA-T-D-R 组合, (173~161Ma)	η-Q η-γ 组合 (174~151Ma)			
175Ma			J <sub>1</sub> 晚期向北倒伏的褶曲和逆冲 (北 京西山), 硬绿泥石十字石-蓝晶 石变质作用 (<178-180, ≥ 175Ma?)	煤田 (No. 19, No.20, No.21), Au (No. 14)	前和初 (期)造山
	J <sub>1</sub> 类磨拉石 含煤建造 (夹凝灰岩 R, 180~178Ma)	η-γ 组合(?) (199~196Ma)			
203Ma	B-TB-BTA-TA-T 组 合, (196~184 Ma)				

注: B—玄武岩; TB—粗面玄武岩; BTA—玄武粗面安山岩; Ta—粗面安山岩; D—英安岩; T—粗面岩; R—流纹岩; v—辉长岩; η v—二长辉长岩; η δ—二长闪长岩; η—二长岩; Q η—石英二长岩; ε—正长岩; A/ε—碱性正长岩; γ—花岗岩; A/γ—碱性花岗岩, Q π—石英斑岩; 火山岩和侵入岩的分类命名分别按 Le Maitre 等 (1989)<sup>[20]</sup>和 Middlemost (1994)<sup>[21]</sup>; 年代框架按 Remane 等<sup>[22]</sup>国际地层表。

和变质作用以及侵入作用, 结束于隆升和剥蚀以及可能的金属成矿作用(?)。每个这样的小旋回符合反时针 PT<sub>t</sub> 轨迹, 亦即从地幔对陆壳的加热开始, 随后由于收缩变形作用引起的陆壳加厚, 最后隆升和剥蚀以及可能的成矿作用(?)。由表 2 可看出几个重要的特征:

(1) 每一个小旋回开始地幔通过玄武岩岩浆底侵作用对陆壳 (特别是该区的原来的太古宙克拉通的冷和刚性强的陆壳) 的加热 (表现为岩浆作用发生在构造变形之前) 使陆壳岩石的流变学条件改变, 以使随后的收缩变形构造和陆壳加厚成为可能。

(2) 前造山幕和后造山幕发育含煤和湖盆沉积建造, 而同造山的 3 幕 (早期、峰期和晚期) 则发育磨拉石建造, 它分别与比较平静的构造环境与强烈活动的挤压收缩构造变形有很好的对应和反馈关系。

(3) 3 幕同造山 (初始期, 早期和峰期) 变质作

用, 在时间和空间上与 3 幕收缩构造变形事件伴生, 从初始期 (J<sub>1</sub><sup>2</sup>) 的低温相对高压的硬绿泥石—十字石—蓝晶石变质作用→早期 (J<sub>2</sub>) 的角闪岩相变质作用→峰期 (J<sub>3</sub>) 的出现眼球状片麻岩的角闪岩相变质作用, 它表明, 从 J<sub>1</sub>→J<sub>3</sub> 温度和压力依次升高, 进而表明, 陆壳被加热得温度愈来愈高, 陆壳加厚作用愈来愈大, 最后导致在峰期造山幕 (J<sub>3</sub>) 时的变质作用的温度和压力亦达峰值。至今还未发现有出露的 K<sub>1</sub><sup>1</sup> 的变质作用, 但是, K<sub>1</sub><sup>2</sup> 的伴随变质核杂岩形成的韧性剪切变形带, 为绿片岩相变质作用, 表明后造山幕是陆壳温度下降的时期。

(4) 在前造山 (J<sub>1</sub>) 和晚造山 (K<sub>1</sub><sup>1</sup>) 幕, 镁铁质火成岩为主, 但是, 在早期和峰期造山幕, 则以长英质火成岩为主, 早期 (J<sub>2</sub>) 幕以安山质为主, 峰期 (J<sub>3</sub>) 则以流纹质和花岗质的为主。它表明前造山幕陆壳正在

被加热,但还未加热达到使太古宙冷的英云闪长质下地壳发生大规模局部熔融形成大量花岗质岩浆所需要的温度。早期幕( $J_2$ )可能导致下地壳英云闪长质岩石的大量局部熔融,大量花岗质岩浆与底侵玄武质岩浆在总体挤压条件下的主要通过岩浆混合作用形成以安山质为主的岩浆活动。峰期( $J_3$ ),则可能整个陆壳已被加热升温,致使上地壳岩石发生大量局部熔融,形成以流纹质和花岗质为主的岩浆活动。晚期( $K_1^1$ )幕,陆壳已开始降温冷却,降温冷却首先从上地壳冷却开始,导致以镁铁质火成岩为主的岩浆活动<sup>[23]</sup>。后造山( $K_2^2$ )幕,则陆壳逐渐降温,岩浆活动逐渐减弱,形成以双峰火成岩为主的组合。这种热演化趋势与变质作用的温度、压力演化趋势,以及与构造变形演化趋势有很好的对应和反馈关系。

(5)大尺度和强烈的金属成矿作用发育于同造山(早期,峰期和晚期)幕,与此形成显明对照的是,前造山( $J_1^1$ )幕和后造山( $K_1^2$ )幕则以形成大煤田为特征。它进一步表明,造山幕的识别和划分,为金属成矿作用与大规模岩浆活动时空相伴生的成生联系提供了好的约束,而比较宁静的构造环境和温热(意指陆壳不是过热的大量岩浆作用发育期)的沉积作用则时空上与形成大煤田相伴生。

另外,热模拟工作<sup>[24-25]</sup>表明,对华北地区原来冷的陆壳的加热,以致导致英云闪长质陆壳大规模的局部熔融作用,产生大量花岗质岩浆,所需要非常大量的底侵玄武岩岩浆的注入陆壳,在对陆壳加热的同时,底侵玄武岩岩浆的放热必然会大量固结,以致真正喷出和侵入的镁铁质岩浆的数量大大减少。上述热模拟的工作表明前造山和初始造山( $J_1$ )幕花岗质侵入体的稀少指示陆壳只是刚刚被加热,但还未达到陆壳大量发生局部熔融所需要的温度,这种已使陆壳加热,但还未达产生大量花岗质岩浆的过热状态,对于成煤作用提供了一个好的地球动力学环境。峰期( $J_3$ )造山幕的大量流纹质的发育,以及花岗岩岩基(如云蒙山花岗岩岩基,八达岭花岗岩岩基)的发育指示,在已经被初步加热的陆壳基础上,玄武岩岩浆的底侵作用对陆壳已可有效地加温,以使上地壳达到发生大量局部熔融的条件,致使岩浆作用、变质作用和构造变形作用,以及陆壳加厚作用达到顶峰。后造山( $K_1^2$ )幕的陆壳的冷却降温,岩浆活动减弱,又使“过热”的陆壳逐渐达到适温(或温热),又一次为成煤作用提供了良好的动力学环境。

因此,总体上,热模拟的工作支持了上述造山幕的识别和划分,以及各造山幕的岩浆活动、沉积作用、变质作用、构造变形作用和成矿作用特征的解释,从而提供了独立的另一种途径的约束。

## 4 金属成矿作用与火成岩组合和岩浆源区

这里,主要从物质组成的角度,讨论火成岩构造组合与成矿作用的关系。众所周知,不同的岩浆有不同的源区,同样,不同的金属矿床,它们亦有不同的源区,如果说,不同的火成岩组合伴生不同的金属矿床,它们应有共同的源区。矿床形成比之火成岩有更为复杂的过程与历史,如矿床形成,特别是岩浆期后矿床除与火成岩有关外,还与成矿溶液性质有关,成矿溶液除了受火成岩控制之外,还受成矿溶液通过的围岩,以至循环的天水系统控制。这里笔者讨论的只是成矿作用的主要母源区,而忽略了围岩和循环天水系统等因素,所以,讨论只能是十分粗略的。

岩浆岩型(如昌平上庄磁铁矿床,图1,表1, No.8)和矽卡岩型 Fe 矿(如河北武安 Fe 矿,图1,表1, No.1)显然与源于地幔的辉长岩类及其有关的闪长岩类的控制,因为,Fe 主要赋存于地幔中,当地幔熔融时,Fe 是易溶元素,会被岩浆萃取出来。Cu 和 Au 亦是亲地幔,但常常通过一个中间的媒介,先在地壳镁铁质岩石中预富集,然后在地壳镁铁质岩石熔融时,萃取进入长英质岩浆中,这样了解它们在地壳岩石中的原始丰度是十分重要的。这样,我们首先要了解华北地区陆壳岩石中 Cu, Au, Mo, Pb, Zn, Ag 的丰度,高山和刘勇胜<sup>[26]</sup>、Yan 和 Chi<sup>[27]</sup>提供了这方面的重要数据,并列于表3。

从表3可以看出,在地壳中,Cu, Au, Zn 在下地壳中,特别是在下地壳下部的基性麻粒岩丰度高;Ag 则二组数据有不同,在 Yan 和 Chi<sup>[27]</sup>数据中,下地壳下部的基性麻粒岩中最高,在高山和刘勇胜<sup>[26]</sup>数据中,上地壳最高。可以看出,高山和刘勇胜<sup>[26]</sup>数据中,下地壳(2)之 Ag 丰度较之下地壳(1)要高,是因为下地壳(2)是根据中国东部下地壳下部为镁铁质麻粒岩包体平均成分计算的,同时下地壳计算中包含了镁铁质和长英质二种麻粒岩,因此,可以推测下地壳镁铁质麻粒岩中 Ag 的丰度会高于下地壳的估算值。而 Yan&Chi<sup>[27]</sup>对下地壳是按中性麻粒岩(相当于下地壳上部)和基性麻粒岩(相当于下地壳

表 3 华北地区陆壳中 Cu、Au、Mo、Pb、Zn、Ag 的平均丰度<sup>[26-27]</sup>(Au、Ag 为  $10^{-9}$ , 其他元素为  $10^{-6}$ )Table 3 Average abundances (ppm) of Cu, Au, Mo, Pb, Zn, Ag in the continental crust of North China<sup>[26-27]</sup>

模型	地壳分层	Cu	Au	Zn	Mo	Pb	Ag	资料来源
模型 1	地壳	30	1.00	74	0.50	13.0	57	文献[27]
	上地壳	18	0.74	60	0.60	17.0	55	
	中地壳	27	0.85	72	0.45	13.0	55	
	下地壳	45	1.50	93	0.50	9.6	60	
	下地壳上部	32	1.30	81	0.45	10.0	56	
	下地壳下部	73	2.00	120	0.60	8.8	69	
模型 2	地壳(1)	37	1.09	75	0.70	15	45	文献[26]
	地壳(2)	40	1.33	81	0.67	17	51	
	上地壳	32	1.24	70	0.78	18	55	
	中地壳	32	0.66	69	0.60	15	48	
	下地壳(1)	46	1.24	85	0.69	11	31	
	下地壳(2)	54	1.92	103	0.59	17	47	

注:下地壳上部为中性麻粒岩和英云闪长质岩石,下地壳下部为基性麻粒岩;下地壳(1)为下地壳下部取全球镁铁质麻粒岩包体平均成分,下地壳(2)为下地壳下部取中国东部镁铁质麻粒岩包体的平均成分。

下部)分别计算的,下地壳下部基性麻粒岩中 Ag 丰度高于下地壳上部中性麻粒岩。因此,二组数据对于 Ag 来说仍大体上是相符合的,采用 Yan 和 Chi<sup>[27]</sup>的下地壳数据更方便些。亦就是说,与 Cu, Au, Zn 一样, Ag 在下地壳下部的基性麻粒岩中最高。可以推测,主要起源于下地壳,特别是下地壳下部基性麻粒岩的岩浆将萃取出更多的 Cu, Au, Zn, Ag;而起源于上地壳岩石的岩浆将萃取出更多的 Mo 和 Pb。因此,通过与金属矿床有成因联系的岩浆起源于下地壳还是上地壳,就有可能总体上把握金属矿床的主要源区。

从表 4 可以看出:(1)Fe 矿与辉长岩-二长闪长岩组合伴生,表明岩浆与矿床主要的源区是地幔丰满的橄榄岩。(2)Cu 矿与二长岩-石英二长岩组合的伴生,表明岩浆与矿床主要起源于侏罗纪底侵的玄武质岩石熔融的结果,之所以看作是侏罗纪形成的下地壳,是因为 Cu 矿及其火成岩组合主要形成于晚期造山(K<sub>1</sub>)幕,此时,原有的太古宙下地壳已在相当程度上被前 3 幕(前造山-初始造山幕(J<sub>1</sub>),早期造山幕(J<sub>2</sub>)和晚期造山幕(J<sub>3</sub>))造山过程中大量底侵的玄武岩及随后的拆沉作用所强烈改造和替代<sup>[18]</sup>。(3)Au 矿床及与

表 4 华北太行—燕山—辽西燕山期造山带火成岩组合和相关的矿床

(据邓晋福等, 2004<sup>[25]</sup>, 邓晋福等, 2007<sup>[13]</sup>, 修改补充)

Table 4 Yanshanian (J-K) igneous rock assemblages and related ore deposits in the Taihangshan-Yanshan-west Liaoning orogenic belt, North China (modified after Deng et al., 2004; Deng et al., 2007)

火成岩组合	矿床	主要源区及其组成	图 1 和表 1 中的实例
辉长岩-二长闪长岩	Fe	地幔, 丰满的橄榄岩	武安 Fe, 上庄 Mt (磁铁矿)
二长岩-石英二长岩	Cu	下地壳镁铁质(侏罗纪时底侵的玄武质岩石)	涞源 Cu, 寿王坟 Cu
花岗岩	Au	下地壳镁铁质(太古麻粒岩)	峪耳崖 Au, 牛心山 Au, 金厂峪 Au, 排山楼 Au
花岗岩	Mo	上地壳长英质(太古麻粒岩)	大庄科 Mo
石英斑岩和流纹岩	Pb、Zn、Ag	下地壳长英质(太古宙和/或侏罗纪)	蔡家营 Pb、Zn、Ag



它们分别伴生的花岗岩组合,可能起源于太古宙形成的镁铁质下地壳,因为,Au 矿主要熔于  $J_1$  (前造山—初始造山幕)和  $J_2$  (早期造山幕),此时,原有太古宙的冷的下地壳才开始发生熔融( $J_1$ )和较大量的熔融作用( $J_2$ )。(4)Mo 矿床及其伴生的花岗岩组合,可能起源于含 Mo 丰度最高的上地壳,它与  $J_3$  的峰期造山幕相对应,此时陆壳已被加热到最高的峰期,大量上地壳熔融形成数量最多的花岗岩,并伴生 Mo 矿。(5)表 4 中所列的 Pb、Zn、Ag 矿,以及伴生的石英斑岩和流纹岩,主要指图 1,表 1 中所列的 No.6 (蔡家营矿床),可能是下地壳长英质岩石(太古前形成的,或侏罗纪形成的)源区。

## 5 讨论:造山过程、岩浆源区与成矿作用

由上面的讨论,虽然仍有不少问题有待进一步的研究,总体上可以提出该区造山幕与成矿作用的框架模型,用以表述造山过程,岩浆源区与成矿作用的可能的成生关系(表 2):

(1)前造山幕—初始造山幕( $J_1$ ),前造山幕的玄武岩岩浆注入陆壳,对原有太古宙克拉通的冷地壳的初步加热,以及玄武质和玄武安山质岩浆的喷发,创造一个温热的环境,以及玄武质岩浆喷发(伸展与裂谷作用对应)结束之后,进入后裂谷期的比较稳定的构造环境,为形成大煤矿提供了良好的动力学环境;这一幕的下部陆壳初步加热,有可能局部地段发生熔融作用,形成花岗岩与 Au 矿(如金厂峪 Au 矿)。

(2)早期造山幕( $J_2$ ),大量玄武质岩浆的底侵作用和下地壳在初步加热( $J_1$ )的背景下的再一次加热,以使下地壳大规模地熔融,此时,由于陆壳已初步被加热,底侵玄武岩冷却的数量大大小于  $J_1$ ,使玄武质岩浆与陆壳花岗质岩浆的混合作用在收缩构造背景下变为可能,大量安山质岩浆的形成,并伴生 Au 矿(如峪耳崖 Au 矿,牛心山 Au 矿)。

(3)峰期造山幕( $J_3$ ),大量玄武质岩浆的又一次底侵,在陆壳温度已经比较高的背景下,岩浆熔融区往浅部发展,陆壳升温达峰期使上地壳岩石大规模熔融,大量花岗质岩浆的低密度,可能提供一个密度堤坝,使下伏的玄武质岩浆和可能的岩浆混合形成的安山质岩浆不能有效地大量喷出或运移到地壳浅部形成侵入岩,造成现今剥露于地表的主要是面积巨大的花岗岩岩基(如云蒙山花岗岩,八达岭花岗

岩),并伴生大量 Mo 矿(如大庄科 Mo 矿),以及石英二长岩和斑岩伴生的 Cu 矿床(如涞源 Cu 矿)。

(4)晚期造山幕( $K_1^1$ ),“过热”的陆壳开始冷却,冷却是从地壳上部开始的,底侵的玄武质和玄武—安山质岩浆又大量喷发(如义县组火山岩),并形成不少辉长岩侵入体(如上庄岩体,棋盘岩岩体),与辉长岩—二长闪长岩组合伴生的 Fe 矿床(如上庄矿床,武安矿床);侏罗纪形成的新的玄武质下地壳熔融形成二长岩—石英二长岩组合,并伴生 Cu 矿(如寿王坟 Cu 矿)。

(5)后造山幕( $K_1^2$ ),陆壳逐渐冷却,岩浆活动减弱,使“过热的”陆壳逐渐变为温热环境,以及收缩挤压构造变形的结束所创造的比较宁静的构造环境,再一次为大煤矿的形成提供了良好的动力学环境。同时伴生低温的 Pb、Zn、Ag 矿床(如蔡家营矿床),和低温的剪切带 Au 矿(如排山楼 Au 矿)。

最后,仍需强调,对于金属成矿作用的年龄,及其与岩浆活动和造山带的成生对应关系的初步讨论,是尝试性的,需要今后进一步的验证、补充、修改和完善。

感谢耿树方和王学明二位教授的约稿。

## 参考文献(References):

- [1] Wong W H. Crustal movements and igneous activities in eastern China since Mesozoic time [J]. Bulletin of Geological Society China, 1927, 6:9-37.
- [2] 邓晋福,滕吉文,彭聪,等.中国地球物理场特征及深部地质与找矿[M].北京:地质出版社,2008.  
Deng jinfu, Teng Jiwen, Peng cong, et al. Characteristics of the Geophysical Fields, Deep Geology and Mineralizing Processes in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [3] 邓晋福,苏尚国,刘翠,等.华北太行—燕山—辽西地区燕山期(J—K)造山过程与成矿作用[J].现代地质,2007,21(2):232-240.  
Deng jinfu, Su shangguo, Liu cui, et al. Yanshanian (Jura - Cretaceous) orogenic processes and metallogenesis of the Taihangshan—Yanshan—West Liaoning orogenic belt, North China [J]. Geoscience, 2007, 21 (2):232-240 (in Chinese with English abstract).
- [4] 陈斌,刘超群,田伟.太行山中生代岩浆作用过程中壳幔岩浆混合作用:岩石学与地球化学论据[J].地学前缘,2006,13(2):140-147.  
Chen Bin, Liu Chaoqun, Tian Wei. Magma—mixing between mantle—and crustal—derived melts in the process of Mesozoic magmatism, Taihangshan: constraints from petrology and geochemistry [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13 (2):140-147(in

- Chinese with English abstract).
- [5] 牛树银, 陈路, 许传诗, 等. 太行山区地壳演化及成矿规律[M]. 北京:地震出版社, 1994.  
Niu Shuyin, Chen Lu, Xu Chuanshi, et al. The Crustal Evolution and Metallogenesis in Taihangshan Region [M]. Beijing: Seismological Press, 1994(in Chinese with English abstract).
- [6] Davis G A, Zheng Y D, Wang C, et al. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning Provinces, northern China [J]. GSA Memoir, 2001, 194: 171-197.
- [7] 崔盛芹. 燕山地区中生代陆内造山作用 [M]. 北京:地质出版社, 2002.  
Cui shengqin. Meso -Cenozoic Intracontinental Orogenesis in Yanshan Region[M]. Beijing:Geological Publishing House, 2002(in Chinese with English abstract).
- [8] 毛景文, 张作衡, 余金杰, 等. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精测得到启示 [J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(4):289-299.  
Mao Jingwen, Zhang Zuoheng, Yu jinjie, et al. The geodynamic setting for Mesozoic large-scale mineralization in North China and adjacent region: from the isotopic ages of ore deposits [J]. Chinese Science(D), 2003, 33(4):289-299.
- [9] Deng J F, Su S G, Mo X X, et al, The sequence of magmatic - tectonic events and orogenic processes of Yanshan belt, North China [J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(1): 260-266.
- [10] 权恒, 韩庆云, 艾永富, 等. 燕辽地区多金属、金、银成矿与远景 [M]. 北京:地质出版社, 1992.  
Quan Heng, Han Qingyun, Ai Yongfu, et al. The Multi-Metal-Gold, Silver Metallogenesis and Prospecting in Yanshan -West Liaoning Region [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1992 (in Chinese with English abstract).
- [11] 王季亮, 李丙泽, 周德星, 等. 河北省中酸性岩体地质特征及其与成矿关系 [M]. 北京:地质出版社, 1994.  
Wang Jiliang, Li Bingze, Zhou Dexing, et al, The Geology and Related Ore Deposits of Granitic Rocks in Hebei Province[M]. Beijing:Geological Publishing House, 1994 (in Chinese with English abstract).
- [12] 罗镇宽, 裴有守, 关康, 等. 冀东峪耳崖和牛心山花岗岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(4):278-285.  
Luo Zhenkuan, Qiu Youshou, Guan Kang, et al. SHRIMP U-Pb Dating on Zircon from Yu'erya and Niuxinshan Granite Intrusions in Eastern Hebei Province[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2001, 20 (4):278-285 (in Chinese with English abstract).
- [13] 李兆鼎, 等. 中国东部中、新生代火成岩及其深部过程 [M]. 北京:地质出版社, 2003.  
Li Zhaonai, et al. Mesozoic, Cenozoic Igneous Rocks and Deep Processes [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2003 (in Chinese with English abstract).
- [14] 毛景文, 胡瑞忠, 陈毓川, 等. 大规模成矿作用与大型矿集区(上册)[M]. 北京:地质出版社, 2006.  
Mao Jingwen, Hu Ruizhong, Chen yuchuan, et al. The Large - Scale Mineralization and Prediction for the Large Mineralized Clusters (I) [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2006 (in Chinese with English abstract).
- [15] 河北省地质矿产局. 河北省北京市天津市区域地质志 [M]. 北京:地质出版社, 1989.  
Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional geology of Hebei Province, Beijing Municipality and Tianjin Municipality [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1989(in Chinese with English abstract).
- [16] 北京市地质矿产局. 北京市区域地质志 [M]. 北京:地质出版社, 1991.  
Beijing Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional Geology of Beijing Municipality[M]. Beijing:Geological Publishing House, 1991(in Chinese with English abstract).
- [17] 辽宁省地质矿产局. 辽宁省区域地质志 [M]. 北京:地质出版社, 1989.  
Liaoning Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional Geology of Liaoning Province [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1989(in Chinese with English abstract).
- [18] 邓晋福, 苏尚国, 刘翠, 等. 关于华北克拉通燕山期岩石圈减薄的机制与过程的讨论:是拆沉, 还是热侵蚀和化学交代? [J]. 地学前缘, 2006, 13(2):105-119.  
Deng Jinfu, Su Shangguo, Liu Cui, et al. Discussion on the lithospheric thinning of the North China craton: delamination? or thermal erosion and chemical metasomatism? [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(2):105-119(in Chinese with English abstract).
- [19] 白志明, 许淑贞, 葛世伟. 八达岭花岗岩[M]. 北京:地质出版社, 1991.  
Bai Zhiming, Xu Shuzhen, Ge shiwei. Badaling Granites [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1991 (in Chinese with English abstract).
- [20] Le Maitre R W. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms [M]. Oxford: Blackwell Sci. Pub, 1989.
- [21] Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. Earth Science. Review, 1994, 37: 215-224.
- [22] Remane J, Faure -Muret A, Odin G S. International stratigraphic Chart [J]. J Stratigraphy, 2000, 24 (suppl.):321-340.
- [23] Davis G A. The Yanshan belt of North China: tectonics, adakitic magmatism, and crustal evolution [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(4):373-384.
- [24] 刘翠, 邓晋福, 苏尚国, 等. 华北地区燕山期岩浆活动热供给的初步数值模拟[J]. 地学前缘, 2006, 13(2):158-164.  
Liu Cui, Deng Jinfu, Su Shangguo, et al. The numerical simulation of heat fluxes of Yanshanian igneous activity, North China[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13 (2):158-164 (in Chinese with English abstract).
- [25] 邓晋福, 邱瑞照, 肖庆辉, 等. 对流地幔输入大陆与大陆成矿作

- 用 [J]. 矿产地质, 2004, 23(增刊):24-31.
- Deng jinfu, Qiu ruizhao, Xiao qinghui, et al. Input of convective mantle materials into continent and continental metallogenesis [J]. Mines and Geology, 2004, 23 (Supp.):24-31 (in Chinese with English abstract).
- [26] 高山, 刘勇胜. 大陆地壳深部结构与组成[C]//郑永飞. 化学地球动力学. 北京:科学出版社, 1999:168-201.
- Gao Shan, Liu Yongsheng. The deep crustal structure and composition [C]//Zheng yongfei (ed.). Chemical Geodynamics. Beijing:Science Press, 1999:168-201 (in Chinese with English abstract).
- [27] Yan M C, Chi Q H. The Chemical Compositions of the Continental Crust and Rocks in the Eastern Part of China [M]. Beijing:Science Press, 2005.

## Yanshanian (Jurassic–Cretaceous) orogenic processes, magma sources and metallogenesis as well as coal formation in the Taihangshan–Yanshan–West Liaoning region

DENG Jin-fu<sup>1,2</sup>, FENG Yan-fang<sup>1,2</sup>, LIU Cui<sup>2</sup>,  
XIAO Qing-hui<sup>1</sup>, SU Shang-guo<sup>2</sup>, ZHOU Su<sup>2</sup>, GAO Yan-guang<sup>3</sup>

(1. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China; 2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. China Geological Survey, Beijing 100037, China)

**Abstract:** The Taihangshan–Yanshan–West Liaoning region constitutes the Yanshanian Au–Mo–Pb–Zn–Ag–Cu–Fe metallogenic belt and also serves as an important coalfield area in East China. This paper first dealt with isotopic ages of both ore deposits and related intrusive rocks and then selected some relatively reasonable ages for ore deposits as well as ages for coal–formation. Based on the magmatic–tectonic event sequence available, the authors put forward a preliminary scheme for the magmatic–sedimentary–tectonic–metamorphic–metallogenic event sequence. During the pre–orogenic and initial orogenic episode ( $J_1$ ) and the post–orogenic episode ( $K_1^2$ ), both the calm tectonics and the warm environment probably served as good geodynamic settings for the formation of large coalfields. During the syn–orogenic episode, the large–scale magmatism might have been a good geodynamic setting for the formation of ore deposits. Magmatism and related mineralization during the early, peak and late orogenic episodes ( $J_2, J_3, K_1^1$ ) are also discussed.

**Key words:** Yanshanian (J–K); Taihangshan–Yanshan–West Liaoning orogenic belt; magmatic–sedimentary–metamorphic–tectonic–metallogenic event sequence

---

**About the first author:** DENG Jin-fu, male, born in 1935, professor, engages in the study of igneous rocks; E-mail: dengjinfu@21cn.com.